Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Техническая физика»

МЕХАНИКА И ТЕРМОДИНАМИКА ЗВУКА В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Методические указания к лабораторной работе

Минск
БНТУ
2010

УДК 534.21(076.5)(075.8)
ББК 22.32я7
М 55

Составители:
В.А. Мартинович, С.И. Шеденков, Е.Ю. Неумержицкая

Рецензенты:
Н.П. Юркевич, И.А. Хорунжий

В методических указаниях приведена краткая теория распространения звуковых волн в газовой среде. Рассмотрены условия образования стоячих звуковых волн смещения, колебательной скорости и избыточного давления. Показана связь между механикой и термодинамикой звуковой волны. В лабораторной работе необходимо методом стоячей волны определить скорость звука в воздухе, рассчитать показатель политропы и по его значению установить характер термодинамического процесса в газе при распространении звуковой волны.

Цель работы

1. Изучить механику и термодинамику звука в газе.
2. Определить методом стоячей волны скорость звука в воздухе.
3. Рассчитать показатель политропы и по его значению определить характер термодинамического процесса в газе при воздействии на него звуковой волны.

Приборы и принадлежности

1. Осциллограф.
2. Звуковой генератор.
3. Измерительный стенд.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое волна, волновой фронт, волновая поверхность, длина волны? Какие существуют виды волн? Какие волны называются гармоническими?
2. Что представляет собой звуковая волна в газе?
3. Получите уравнение бегущей волны, определите физические величины, входящие в уравнение.
4. Какими величинами характеризуется распространение звуковой волны в воздухе? Запишите уравнения волн, соответствующих данным величинам.
5. Что такое стоячая волна? Получите уравнение стоячей волны и рассчитайте координаты узлов и пучностей.
6. Чем отличаются стоячая и бегущая волны?
7. Как распределены узлы и пучности стоячих волн смещения, колебательной скорости и избыточного давления в столбе воздуха?
8. Сформулируйте условия образования узлов и пучностей на границе отражения волн.

9. Что такое показатель политропы? Запишите формулу для определения скорости звука в воздухе.

10. Какой термодинамический процесс происходит в газе при распространении звуковой волны?

11. Каким способом определяется длина стоячей волны в данной работе?

Указания по технике безопасности

Приборы питаются от сети переменного напряжения 220 В.

НЕ РАЗРЕШАЕТСЯ РАБОТАТЬ ПРИ ПОВРЕЖДЕННОЙ ИЗОЛЯЦИИ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ПРОВОДОВ!

Введение

Волной или *волновым процессом* называется процесс распространения колебаний в упругой среде. При распространении волны частицы среды не движутся вместе с ней, а совершают колебания около своих положений равновесия. Вместе с волной от частицы к частице среды передается колебательное движение и энергия. Поэтому основным свойством всех волн, независимо от их природы, является перенос энергии без переноса вещества.

Упругая волна называется *продольной*, если частицы среды колеблются в направлении распространения волны. Продольные волны связаны с объемной деформацией упругой среды и поэтому могут распространяться в любой среде – жидкой, твердой, газообразной.

Упругая волна называется *поперечной*, если частицы среды совершают колебания в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны. Поперечные волны связаны с деформацией сдвига упругой среды и поэтому могут возникать только в твердых телах.

Волновым фронтом называется геометрическое место точек, до которого в данный момент времени дошло колебательное движение. *Волновой поверхностью* называется геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе. Через каждую точку среды можно провести только одну волновую поверхность. Множеству различных значений фазы колебаний соответствует семейство волновых поверхностей. Волна называется *плоской*, если ее волновые поверхности представляют совокупность плоскостей, параллельных друг другу.

Звуковыми волнами называются упругие волны малой интенсивности, т.е. слабые механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде. Звуковые волны, воздействуя на органы слуха человека, способны вызывать звуковые ощущения, если частоты соответствующих им колебаний лежат в пределах от 16 Гц до 20 кГц – слышимые звуки. Упругие волны с частотами меньшими, чем 16 Гц называют *инфразвуком*, а с частотами большими, чем 20 кГц – *ультразвуком.*

Звуковая волна в газе является *продольной* и представляет собой последовательность чередующихся областей *сжатия* и *разрежения* газа. При распространении звуковой волны в газе изменяются параметры термодинамического состояния. Это значит, что волна в газовой среде связана с *механическими* и *термодинамическими* явлениями одновременно.

Уравнение бегущей волны

Уравнением волны называется зависимость от координат и времени скалярных или векторных величин, характеризующих колебания среды при прохождении в ней рассматриваемой волны. Например, для поперечных волн такой величиной может служить вектор смещения частицы среды из положения равновесия или три его проекции на оси координат.

Для вывода уравнения бегущей волны рассмотрим плоскую поперечную синусоидальную волну, распространяющуюся вдоль положительного направления оси *OX.* Упругая волна называется *синусоидальной* (гармонической), если соответствующие ей колебания частиц среды являются гармоническими (рис. 1).

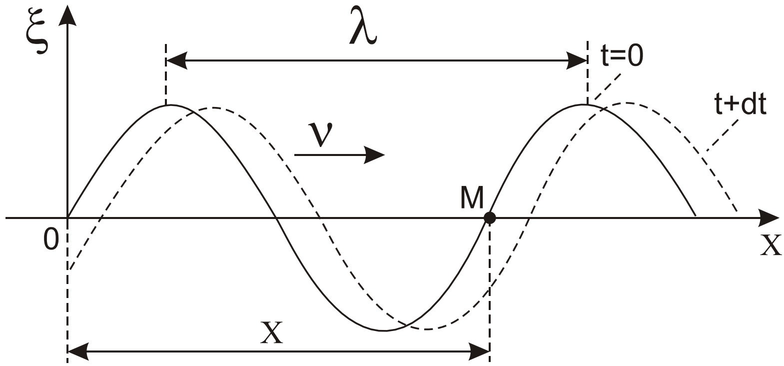

Рис. 1. Бегущая волна в момент времени t = 0 и $t + dt$.

Если колебания точек среды, лежащих в плоскости $x = 0$ (см. рис.1) описываются функцией $\xi(0,t) = A\sin\omega t$, то точка среды M будет колебаться по тому же закону, но ее колебания будут отставать от колебаний в точке O на время $\tau = x/\upsilon$, где υ – скорость распространения волны. И тогда уравнение колебаний частиц, лежащих в плоскости X будет иметь вид

$$\xi(x,t) = A\sin\omega\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right),$$

где ω – циклическая частота;

A – амплитуда.

Это *уравнение плоской бегущей волны*. Волна называется бегущей, так как «гребни» волны перемещаются в направлении распространения волны со скоростью υ. Вид волны через время dt показан на рис. 1.

Для характеристики синусоидальной волны используется *волновое число*

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\upsilon T} = \frac{\omega}{\upsilon}, \qquad (1)$$

где T – период колебаний;

λ – *длина волны* (расстояние, на которое волна распространяется за период $\lambda = \upsilon T$).

С учетом (1) уравнение волны примет вид

$$\xi(x,t) = A\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{x}{\upsilon}\right) = A\sin(\omega t - kx).$$

Скорость υ распространения синусоидальной волны называется *фазовой скоростью*. Она равна скорости перемещения в пространстве точек поверхности, соответствующей любому фиксированному значению фазы, т.е. скорости волновой поверхности.

Распространение продольных волн рассмотрим на примере звуковой волны в столбе воздуха. Пусть имеется длинная труба, наполненная воздухом (рис. 2). С левого конца в нее вставлена плотно прилегающая к стенкам мембрана M, совершающая гармонические колебания со звуковой частотой. Колеблющаяся мембрана создает попеременно сжатие и разрежение в соседствующей с ней области воздуха, благодаря чему образуется продольная волна. Как и в случае поперечных волн, каждый участок среды, по которому идет продольная волна, совершает очень небольшие по размаху колебания, в то время как сама волна может распространяться на значительные расстояния. К продольной волне, также как и к поперечной, применимы понятия длины волны, частоты и скорости.

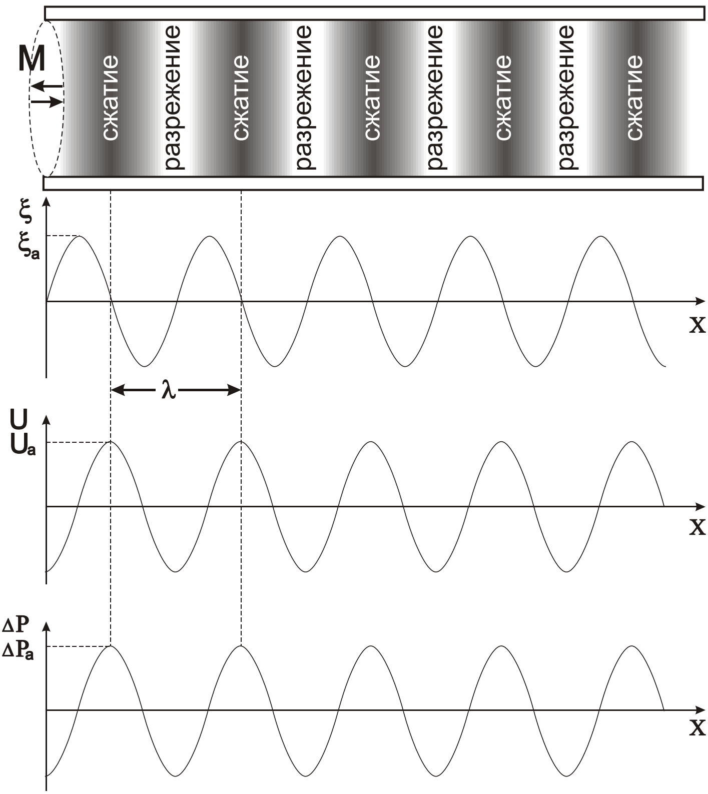

Рис. 2. Графики зависимости смещения, колебательной скорости частиц и избыточного давления от координаты для гармонической звуковой волны (λ – расстояние между областями сжатия или разрежения)

Будем характеризовать звуковую волну в газе смещением частиц ξ, их колебательной скоростью u и избыточным давлением Δp. Для звуковых волн эти отклонения от равновесных значений всегда малы. Так, избыточное давление Δp, связанное с волной, намного меньше статического давления газа p_0 и составляет лишь около одной миллионной атмосферного давления. Эти величины подвергаются гармоническим колебаниям, и каждой из них соответствует своя волна. Эти волны определяются следующими уравнениями:

$$\xi = \xi_a \sin(\omega t - k\,x);$$

$$u = u_a \cos(\omega t - k\,x);$$

$$\Delta p = \Delta p_a \cos(\omega t - kx), \quad \Delta p_a << p_0,$$

где ξ_a, u_a и Δp_a – амплитудные значения колеблющихся величин. Колебательная скорость и избыточное давление получены из уравнения смещения путем дифференцирования по x и t:

$$u = \frac{d\xi}{dt}, \; \Delta p = -B\frac{d\xi}{dx}, \tag{2}$$

где B – модуль объемной упругости.

Как видно из рис. 2, в области сжатия волны (там, где молекулы находятся ближе друг к другу) давление выше нормального, тогда как в области разрежения оно ниже нормального. Волна смещения отличается по фазе от волны давления на четверть длины волны. Там, где давление достигает максимума или минимума, смещение равно нулю, а где изменение давления равно нулю, смещение максимально или минимально.

Интерференция волн. Стоячие волны

Если в среде распространяется одновременно несколько волн, то смещение частиц среды от положения равновесия равно сумме смещений, вызываемой каждой из волн по отдельности. Это вытекающее из опыта утверждение называется *принципом суперпозиции (наложения) волн*.

В случае, когда колебания, обусловленные отдельными волнами в каждой из точек среды, обладают одинаковой частотой и постоянной разностью фаз, волны называются *когерентными.* При сложении когерентных волн возникает явление интерференции, заключающееся в том, что колебания в одних точках усиливают, а в других точках ослабляют друг друга. Очень важный случай интерференции наблюдается при наложении двух встречных плоских волн с одинаковой амплитудой. Возникающий в результате колебательный процесс называется *стоячей волной.*

Стоячая волна – это волна, которая образуется при наложении двух волн с одинаковой амплитудой и частотой, когда волны движутся навстречу друг другу. Практически стоячие волны возникают при отражении волн от преграды. Падающая на преграду волна и бегущая ей навстречу отраженная волна, налагаясь друг на друга, дают стоячую волну.

Запишем уравнения двух плоских волн, распространяющихся вдоль оси x в противоположных направлениях:

$$\xi_1 = A\sin(\omega t - kx);$$

$$\xi_2 = A\sin(\omega t + kx).$$

Применяя принцип суперпозиции и преобразовав результат по формуле для суммы синусов, получим:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A\cos kx \sin\omega t \text{ – \textit{уравнение стоячей волны}}.$$

Заменив волновое число k его значением $k = 2\pi/\lambda$, получим уравнение стоячей волны, удобное для анализа колебаний частиц в стоячей волне:

$$\xi = \left(2A\cos 2\pi\frac{x}{\lambda}\right)\sin\omega t .$$

Из этого уравнения видно, что в каждой точке стоячей волны происходят колебания той же частоты, что и у встречных волн, причем амплитуда колебаний зависит от x:

$$A(x) = 2A\cos 2\pi\frac{x}{\lambda}.$$

В точках, координаты которых удовлетворяют условию

$$\cos 2\pi\frac{x}{\lambda} = \pm 1 \;\Rightarrow\; 2\pi\frac{x}{\lambda} = \pm 2n\frac{\pi}{2} \quad (n = 0, 1, 2, 3, \ldots),$$

амплитуда колебаний достигает максимального значения. Эти точки называются *пучностями* стоячей волны. Значения координаты n-й пучности

$$x_{пучн} = \pm 2n\frac{\lambda}{4} \;\; (n = 0, 1, 2, 3, \ldots).$$

В точках, координаты которых удовлетворяют условию

$$\cos 2\pi\frac{x}{\lambda} = 0 \;\Rightarrow\; 2\pi\frac{x}{\lambda} = \pm(2n+1)\frac{\pi}{2} \quad (n = 0, 1, 2, 3, \ldots),$$

амплитуда колебаний обращается в нуль. Эти точки называются *узлами* стоячей волны. Точки среды, находящиеся в узлах, колебаний не совершают. Координаты n-го узла имеют следующие значения:

$$x_{узл} = \pm(2n+1)\frac{\lambda}{4} \;\; (n = 0, 1, 2, 3, \ldots).$$

Из этих формул следует, что расстояние между соседними пучностями, так же как и расстояние между соседними узлами, равно $\lambda/2$, что равно *длине стоячей волны*: $\lambda_{ст} = \lambda/2$. Пучности и узлы сдвинуты друг относительно друга на четверть длины волны.

На рис. 3 представлен график смещения точек от положения равновесия для момента времени t (сплошная кривая) и график отклонений точек для момента времени $t+T/2$ (пунктирная кривая). Как видно из рисунка, точки, лежащие по разные стороны от узла, колеблются в противофазе. Все точки, заключенные между двумя соседними узлами, колеблются синфазно (т.е. в одинаковой фазе). Таким образом, отличие стоячей волны от бегущей в том, что между соседними узлами стоячей волны все точки среды колеблются в одинаковой фазе, но с разными амплитудами, тогда как в бегущей волне, наоборот, с запаздыванием по фазе, но с одинаковой амплитудой.

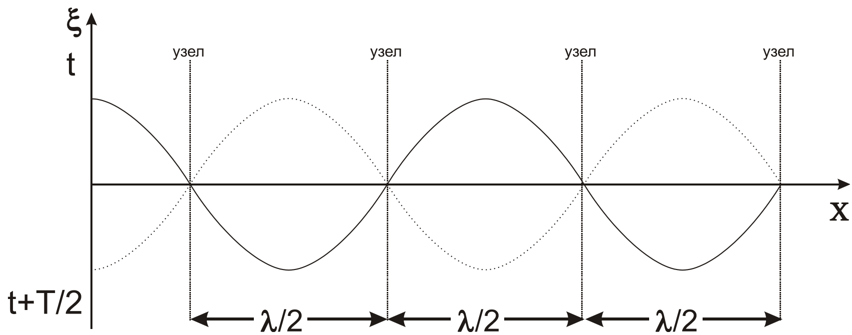

Рис. 3. Стоячая волна в моменты времени t и $t + T/2$

Стоячая волна, в отличие от бегущей, не переносит энергию. Дважды за период происходит превращение энергии стоячей волны то полностью в потенциальную энергию, сосредоточенную в основном вблизи узлов волны, то полностью в кинетическую энергию, сосредоточенную в основном вблизи пучностей волны. В результате происходит переход энергии от каждого узла к соседним пучностям и обратно. Средний по времени поток энергии в любом сечении волны равен нулю.

Рассмотрим образование стоячих звуковых волн в столбе воздуха. Если открытый конец трубы закрыть поршнем, то в ней появится отраженная волна. Бегущая и отраженная волны накладываются друг на друга, и при определенных условиях (*длина столба воздуха должна быть кратна* $\lambda/4$) в столбе воздуха возникает стоячая волна с четко выраженными узлами и пучностями, как это показано на рис. 4.

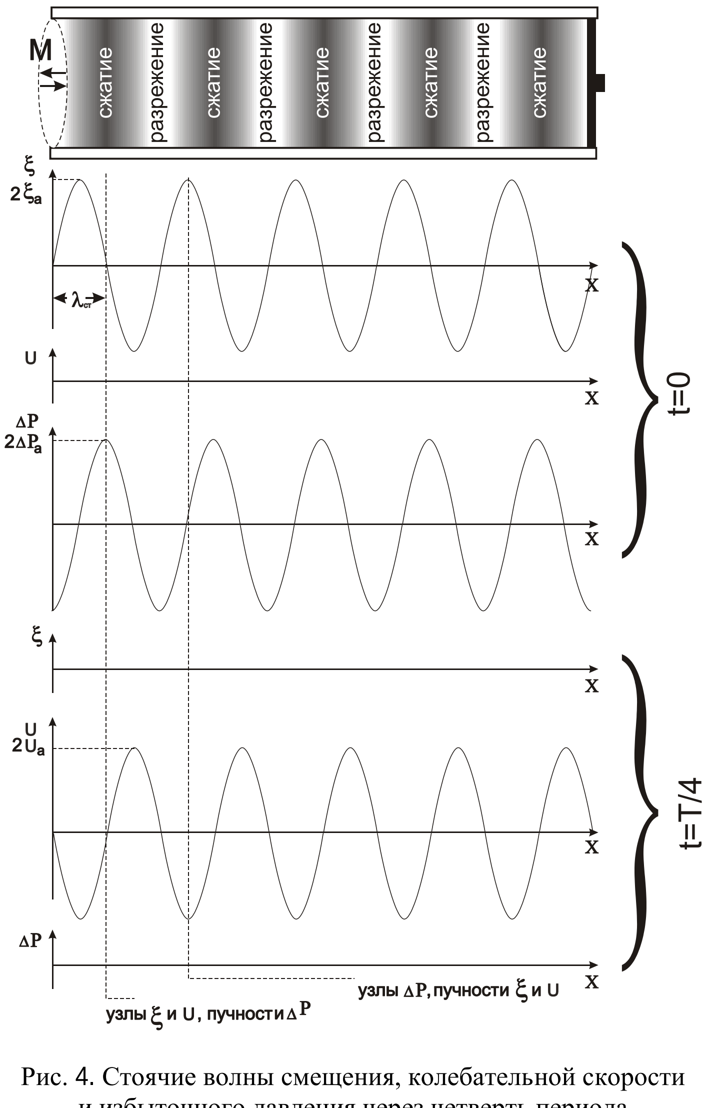

Рис. 4. Стоячие волны смещения, колебательной скорости и избыточного давления через четверть периода ($\lambda_{ст}$ – расстояние между областями наибольшего сжатия и разрежения)

Получим уравнения стоячих волн смещения, колебательной скорости и избыточного давления. Уравнение бегущей волны имеет вид

$$\xi_1 = \xi_a \sin(\omega t - kx).$$

Уравнение отраженной волны имеет вид (с учетом *изменения фазы на противоположную при отражении волны от более плотной среды*)

$$\xi_2 = -\xi_a \sin[\omega t + kx].$$

Будет ли на границе отражения узел или пучность, зависит от соотношения плотностей сред. Если среда, от которой происходит отражение, менее плотная, то в месте отражения возникает пучность, если более плотная – узел. Образование узла связано с тем, что волна, отражаясь от более плотной среды, меняет фазу на противоположную. У границы происходит сложение колебаний с противоположными фазами, в результате чего получается узел. Если же волна отражается от менее плотной среды, то изменения фазы не происходит и у границы колебания складываются с одинаковыми фазами – образуется пучность.

Уравнение результирующей волны смещений ξ определяется принципом суперпозиции:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = \xi_a[\sin(\omega t - kx) - \sin(\omega t + kx)] =$$
$$= 2\xi_a \sin kx \cos\omega t = A_\xi(x)\cos\omega t.$$

Это *уравнение стоячей волны* для колебательных смещений ξ молекул газа. Уравнения стоячих волн для колебательной скорости молекул и избыточного давления получаются исходя из уравнений (2):

$$u = -2u_a \sin kx \sin \omega t = A_u(x) \sin \omega t;$$

$$\Delta p = -2\Delta p_a \cos kx \cos \omega t = A_p(x) \cos \omega t,$$

где периодические функции

$$\begin{gathered} A_\xi(x) = 2\xi_a \sin k\,x; \\ A_u(x) = -2u_a \sin k\,x; \\ A_p(x) = -2\Delta p_a \cos k\,x \end{gathered} \qquad (3)$$

выражают амплитуды стоячих волн.

Распределение амплитуд, как видно из (3), повторяется по оси x по гармоническому закону. В некоторых сечениях столба воздуха амплитуды принимают нулевые значения (*узлы*), а в других – максимальные значения (*пучности*).

В стоячих волнах величин ξ и u координаты узлов и пучностей совпадают, тогда как узлы и пучности давления Δp смещены по отношению к ним на $\lambda/4$, что можно видеть на рис. 4. Т.е., в пучностях давления оказываются узлы смещения и колебательной скорости. Это значит, что *в пучностях давления отсутствует колебательное движение газовой среды.* На границе с поршнем для величин ξ и u получается узел, а для Δp – пучность. Причина в том, что падающая и отраженная волны действуют на пограничный слой газа по отношению к величинам ξ и u в противофазе и дают нулевой результат для каждой из них, а по отношению к Δp – в одной фазе и дают максимальный результат.

Расстояние между соседними узлами (или пучностями) равно *длине стоячей волны* $\lambda_{\text{ст}}$ и составляет половину длины бегущей волны λ:

$$\lambda_{\text{ст}} = x_{n+1} - x_n = \frac{\lambda}{2}, \qquad \lambda = 2\lambda_{\text{ст}}.$$

Скорость распространения звука в газе и ее связь с термодинамическими параметрами среды

При распространении волны в газе происходит смещение отдельных локальных частей газа, которые, в свою очередь, подвергаясь сжатию (или разрежению), изменяют свою температуру и другие параметры термодинамического состояния. Это значит, что волна в газовой среде связана как с механическими, так и с термодинамическими явлениями одновременно. Воздух в широком интервале давлений и температур можно считать идеальным газом. Какой же термодинамический процесс возбуждает звуковая волна в воздухе? Можно предположить, что в столбе газа происходит политропический процесс, как наиболее обобщенный из всех процессов. Уравнение, описывающее данный процесс, имеет следующий вид:

$$PV^n = \text{const}, \tag{4}$$

где $n = \dfrac{C_P - C}{C_V - C}$ называется показателем политропы. (5)

Молярная теплоемкость газа C в ходе политропического процесса является постоянной величиной, однако ее значения могут быть весьма различными в зависимости от того, как конкретно этот процесс реализуется. В частности, возможны значения $C = 0$, $C = \pm\infty$, $C = C_V$, $C = C_P$ для адиабатического, изотермического, изохорического и изобарического процессов, соответственно. Для перечисленных выше изопроцессов, как следует из выражения (5), n принимает следующие значения:

$$\begin{aligned}
&n = \pm\infty \quad \text{при} \quad V = \text{const} \ (C = C_V = \tfrac{i}{2}R)\ ;\\
&n = 0 \quad \text{при} \quad P = \text{const}(C = C_P = \frac{i+2}{2})\ ;\\
&n = 1 \quad \text{при} \quad T = \text{const}(C = \pm\infty)\ ;\\
&n = \gamma \quad \text{при} \quad dQ = 0 \left(C = 0, \gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i} \right),
\end{aligned} \tag{6}$$

где i – число степеней свободы молекулы газа;

γ – показатель адиабаты;

R – газовая постоянная.

Для одноатомной молекулы $i = 3$, для двухатомной – $i = 5$, для трехатомной – $i = 6$. В данной работе газовой средой является воздух, основной состав которого определяется двухатомными молекулами кислорода и азота (O_2, N_2). Поэтому для сухого воздуха $\gamma = 1{,}4$. Увлажненный воздух содержит молекулы воды, для которых $i = 6$, по этой причине значения γ для такого воздуха будет несколько отличным от значения 1,4.

Таким образом, определив значение показателя политропы, можно определить характер термодинамического процесса.

Установим связь между скоростью звука и показателем политропы. На основе анализа механических явлений, которые в данной работе не рассматриваются, скорость волны в газе

$$\upsilon = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}},$$

где ρ – плотность среды.

Продифференцируем уравнение (4):

$$n\frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0. \qquad (7)$$

Для m = const можно записать:

$$\rho V = m \Rightarrow \rho dV + V d\rho = 0 \Rightarrow \frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho}. \qquad (8)$$

Как известно, объем, давление и абсолютная температура идеальных газов связаны уравнением Менделеева–Клайперона:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \Rightarrow \quad \frac{P}{\rho} = \frac{RT}{\mu}. \qquad (9)$$

Подставив (8) и (9) в (7), получим:

$$\frac{dP}{d\rho} = \frac{nRT}{\mu}.$$

Следовательно,

$$\upsilon = \sqrt{\frac{nRT}{\mu}}.$$

Полученная формула для скорости волны универсальна, она не связана с каким-либо конкретным термодинамическим процессом. По этой формуле можно решать две противоположные задачи. Если показатель политропы n известен, то определяется скорость волны, и, наоборот, если установлена скорость волны, то находится показатель политропы, и по нему определяется конкретный вид термодинамического процесса. Именно так и ставится задача в данной работе.

Очевидно, изохорический и изобарический процессы должны быть исключены, так как при распространении волны происходит изменение объема и давления локальных областей газа. Изотермический процесс, как считал Ньютон, вполне реален, но тогда, согласно (6),

$$\upsilon = \sqrt{\frac{RT}{\mu}}.$$

Расчеты для воздуха по этой формуле дают значения скорости звука 280 м/с вместо 330 м/с. Приведенное расхождение известно в литературе как ошибка Ньютона. Парадокс ошибки в том, что звуковая волна практически не нагревает воздух, и тем не менее процесс нельзя считать изотермическим.

При адиабатическом процессе, когда $n = \gamma$,

$$\upsilon = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}.$$

Эта формула была получена Лапласом. Расчет по этой формуле дает для скорости звука в воздухе значение 332 м/с, что фактически соответствует действительности. Звуковая волна состоит из следующих друг за другом сжатий и разрежений газа. Над сжатыми областями производится внешняя работа, которая идет на повышение температуры. Разреженные области сами совершают внешнюю работу и благодаря этому охлаждаются. Так как сжатия и разрежения совершаются очень быстро, то температуры между ними не успевают выравниваться: сжатые области всегда теплее разреженных. Наличие этой разности температур повышает перепад давления между сжатиями и разрежениями и ведет к увеличению скорости звука в газах. Это обстоятельство и не было учтено формулой Ньютона.

В данной работе скорость волны определяется экспериментально. По координатам узлов и пучностей рассчитывается длина волны, и скорость находится по формуле

$$\upsilon = \frac{\lambda}{\nu} = \frac{2\lambda_{\text{ст.}}}{\nu},$$

где ν – частота звукового генератора.

Тогда и показатель политропы определяется данными эксперимента:

$$n = \upsilon^2 \frac{\mu}{RT}.$$

Физическая модель эксперимента

Физическая модель выражает те основные исходные положения, в пределах которых выполняются исследования изучаемого явления. Это касается свойств газовой среды и возбуждаемых в ней процессов, особенностей самой волны, а также приближений, допускаемых в постановке эксперимента. Содержание модели:

– газовая среда – воздух – рассматривается как неподвижная, сплошная и изотропная в виде идеального газа;

– установленные для идеальных газов законы принимаются в качестве основных;

– считается, что по воздушному столбу в стеклянной трубе распространяется плоская гармоническая волна, генерирование которой обеспечивается гармоническими колебаниями мембраны, установленной у открытого конца трубы;

– считается, что бегущая к поршню и отраженная от него в обратном направлении волны действуют на столб воздуха в стеклянной трубе совместно в полном соответствии с принципом суперпозиции, образуя стоячие волны.

Методика эксперимента

Экспериментальная установка представлена на рис. 5. У открытого конца стеклянной трубы установлена мембрана М, а в самой трубе на некотором расстоянии от ее конца установлен перемещаемый поршень. Генератор колебаний задает мембране определенную звуковую частоту. При вибрации мембраны возбуждается плоская бегущая волна, которая со скоростью звука распространяется от открытого конца трубы до поршня, отражается от него и с той же скоростью распространяется в обратном направлении к открытому концу трубы, где расположен индикатор И.

Рис. 5. Экспериментальная установка:
1 – осциллограф; *2* – генератор колебаний;
3 – измерительный стенд

Длина воздушного столба в трубе задается положением перемещаемого в ней поршня. Лишь при избранных положениях поршня в воздушном столбе образуется стоячая волна, в том числе стоячая волна смещений, на которой основан эксперимент. В случае пучности на краю трубы индикатор колебаний передает на осциллограф максимальный сигнал, а в случае узла – минимальный сигнал с соответствующим изображением колебательного процесса на экране осциллографа. Перемещая поршень и наблюдая за экраном осциллографа, можно определить по шкале положения поршня l_n и h_n, которые соответствуют узлам и пучностям стоячей волны (рис. 6). Расстояние между соседними положениями поршня, при которых в области мембраны будут наблюдаться пучности смещений и будет равно длине стоячей волны $\lambda_{ст}$. Аналогично, расстояние между соседними положениями поршня, при которых в области мембраны будут наблюдаться узлы смещений, также будет равно длине стоячей волны.

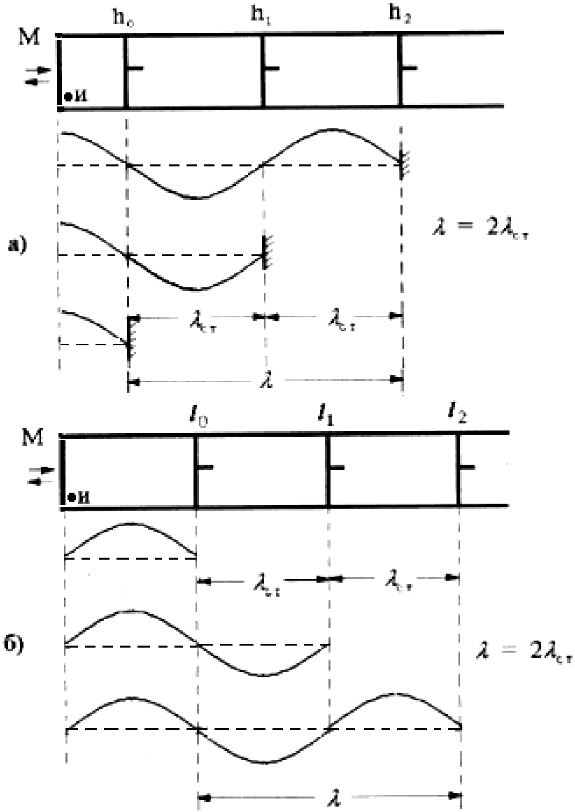

Рис. 6. При перемещении поршня у открытого края трубы будет получаться либо узел, либо пучность стоячей волны смещений (И – индикатор, М – мембрана)

Порядок выполнения работы

1. Включить генератор и осциллограф.
2. Установить на генераторе частоту, которая указана на стенде.
3. Установить подвижный поршень в крайнее левое положение.
4. Перемещая поршень вдоль трубы вправо, определить координаты тех положений поршня, при которых наблюдаются минимумы интенсивности (узлы стоячей волны) l_1, l_2,…, l_n,

а также координаты тех положений, при которых наблюдаются максимумы интенсивности (пучности стоячей волны) h_1, $h_2,\ldots,h_n$. Координату каждого узла и пучности измерять не менее трех раз. Данные занести в табл. 1 и 2.

Минимум и максимум интенсивности определяются по минимуму и максимуму амплитуды сигнала на экране осциллографа.

5. Найти средние значения положений узлов и пучностей $\bar{l}$ и $\bar{h}$.

Таблица 1

Координаты узлов

№ п/п	l_1, 10^{-3} м	l_2, 10^{-3} м	l_3, 10^{-3} м	l_4, 10^{-3} м	l_5, 10^{-3} м
1					
2					
3					
Среднее значение	$\bar{l}_1 =$	$\bar{l}_2 =$	$\bar{l}_3 =$	$\bar{l}_4 =$	$\bar{l}_5 =$

Таблица 2

Координаты пучностей

№ п/п	h_1, 10^{-3} м	h_2, 10^{-3} м	h_3, 10^{-3} м	h_4, 10^{-3} м	h_5, 10^{-3} м
1					
2					
3					
Среднее значение	$\bar{h}_1 =$	$\bar{h}_2 =$	$\bar{h}_3 =$	$\bar{h}_4 =$	$\bar{h}_5 =$

6. Определить значения длины стоячей волны, как разность между координатами соседних узлов $\lambda_{\text{ст}} = \bar{l}_n - \bar{l}_{n-1}$ и соседних пучностей $\lambda_{\text{ст}} = \bar{h}_n - \bar{h}_{n-1}$($\lambda_{1\ \text{ст}} = l_2 - l_1$, $\lambda_{2\ \text{ст}} = l_3 - l_2$, $\lambda_{3\ \text{ст}} = l_4 - l_3$, $\lambda_{4\ \text{ст}} = l_5 - l_4$, $\lambda_{5\ \text{ст}} = h_2 - h_1$ и т.д.). Данные занести в табл. 3.

Таблица 3

№ п/п	$\lambda_{i\ \text{ст}}$, 10^{-3} м	$\Delta\lambda_{i\ \text{ст}}$, 10^{-3} м
1		
2		
3		
n		
Среднее значение	$\lambda_{\text{ст.ср}} =$	$\Delta\lambda_{\text{ст.ср}} =$

7. Найти среднее значение длины стоячей волны $\lambda_{\text{ст.ср}}$ и среднее значение отклонений от среднего $\Delta\lambda_{\text{ст.ср}}$.

8. Рассчитать полную абсолютную погрешность определения длины стоячей волны:

$$\Delta\lambda_{\text{ст}} = \sqrt{\Delta\lambda^2_{\text{ст.ср.}} + \Delta L^2_{\text{пр}}},$$

где $\Delta L_{\text{пр}} = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ м.

9. Определить скорость звука в воздухе υ и значение показателя политропы n:

$$\upsilon = 2\lambda_{\text{ст.ср.}}\nu, \; n = 4\lambda^2_{\text{ст.ср.}}\nu^2 \frac{\mu}{RT}.$$

10. Определить относительные и абсолютные погрешности величин λ, υ и n:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{\Delta\lambda_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст.ср}}};$$

$$\varepsilon_\upsilon = \frac{\Delta\lambda_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст.ср}}} + \frac{\Delta\nu}{\nu}; \quad \Delta\upsilon = \upsilon\varepsilon_\upsilon;$$

$$\varepsilon_n = 2\frac{\Delta\lambda_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст.ср}}} + 2\frac{\Delta\nu}{\nu} + \frac{\Delta\mu}{\mu} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta T}{T}\ ;\ \Delta n = n\varepsilon_n .$$

11. По значению показателя политропы n определить характер термодинамического процесса в газе при воздействии на него звуковой волны.

12. Записать значения λ, υ и n с учетом погрешностей и сделать выводы.

Ниже приведены значения констант и их погрешности, необходимые для вычислений.

Величина	Значение величины	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность, %
ν, Гц	см. на стенде	5	–
μ, кг/моль	$29{,}0 \cdot 10^{-3}$	$0{,}05 \cdot 10^{-3}$	0,17
R, Дж/моль · К	8,31	0,005	0,006
T, К	см. на стенде	0.5	–

Литература

1. Сивухин, Д.Е. Общий курс физики: в 2 т. / Д.Е. Сивухин. – М.: Наука, 1989. – Том 1. Механика. – 576 с.

2. Савельев, И.В. Курс общей физики: в 2 т. / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1970. – Том 1. Механика, колебания и волны, молекулярная физика. – 512 с.

3. Головейко, А.Г. Механика и термодинамика звука в газовой среде: методические указания к лабораторной работе / А.Г. Головейко, Г.И. Новикова. – Минск: Издательский центр кафедры технической физики, 2000. – 34 с.

Учебное издание

МЕХАНИКА И ТЕРМОДИНАМИКА ЗВУКА В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Методические указания к лабораторной работе

Составители:
МАРТИНОВИЧ Валерия Александровна
ШЕДЕНКОВ Сергей Игнатьевич
НЕУМЕРЖИЦКАЯ Елена Юрьевна

Редактор И.Ю. Никитенко
Компьютерная верстка Д.А. Исаева

Подписано в печать 7.10.2010.
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1,51. Уч.-изд. л. 1,18. Тираж 50. Заказ 825.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.
ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.
Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.