


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ
Зав. отделением
экспериментальной физики
ИЯТШ

 А.М. Лидер
« ___ » _____ 2018 г.

ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА И ОБРАЗОВАНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН

Методические указания к выполнению лабораторной работы ПК-07
по курсу «Физика 2» по разделу «Колебания и волны»
для студентов всех направлений и специальностей

Издательство
Томского политехнического университета

УДК 531.381
ББК 22.3

Эффект Доплера и образование ударных волн: методические указания к выполнению лабораторной работы ПК-07 по курсу «Физика 2» по разделу «Колебания и волны» для студентов всех направлений и специальностей/В.А. Стародубцев, Т.Н. Мельникова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – 18 с.

УДК 531.381
ББК 22.3

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром отделения экспериментальной физики
«__»_____2018 г.

Председатель учебно-методической
комиссии

 А.М. Лидер

Рецензент
Доктор педагогических наук,
профессор отделения ЭФ ИЯТШ НИ ТПУ
Г.В. Ерофеева

ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА И ОБРАЗОВАНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН

Цель работы: Знакомство с эффектом, характерным для всех волновых процессов; определение условий формирования ударных волн в упругой среде.

1. ВВЕДЕНИЕ



Доплер Кристиан (1803–1853), австрийский физик и астроном, член Венской АН (1848 г.). Учился в Зальцбурге и Вене. С 1847 г. профессор Горной академии в Хемнице, с 1850 г. профессор Политехнического института и университета в Вене. Основные труды посвящены aberrации света, теории микроскопа и оптического дальномера, теории цветов и др. В 1842 г. теоретически обосновал зависимость частоты колебаний, воспринимаемых наблюдателем, от скорости и направления движения наблюдателя относительно источника колебаний.

Волновые процессы лежат в основе различных по своей природе явлений, таких как распространение звуковых, сейсмических волн, радиоволн, света, волн Релея и волн де Бройля. Наиболее простой моделью волновых процессов является модель гармонической волны.

Бегущие гармонические волны возникают в упругой, условно не имеющей границ среде, когда одна из ее точек (источник) совершает гармонические колебания под действием внешней силы. По определению, *бегущей гармонической волной* называется процесс распространения гармонического колебательного движения. В тех случаях, когда внешнее воздействие вызывает аperiodическое движение источника, в среде распространяется аperiodический волновой импульс. Для волнового движения остаются применимыми понятия амплитуды, частоты, периода и фазы колебания. Дополнительно к ним, для волновых явлений используется еще и пространственная характеристика процесса — длина волны. *Длиной волны* λ называется пространственный интервал (расстояние) на котором происходит одно полное гармоническое колебание.

В технических приложениях иногда используют это определение и для процесса распространения негармонических колебаний. Следствием определения X является формула (1) для расчета длины волны:

$$\lambda = v T, \quad (1)$$

где v – фазовая скорость движения волны, T – период колебания.

Если источник волн остается неподвижным по отношению к среде, в которой он возбуждает волны, то скорость распространения волны определяется только свойствами среды. Многочисленные опыты показали, что в однородных и изотропных средах упругие, электромагнитные и другие типы волн распространяются с постоянной по величине скоростью, называемой *фазовой*. Поэтому можно рассчитать длину волны по зависимости (2):

$$\lambda = v_{\phi} T = \frac{v_{\phi}}{\nu}, \quad (2)$$

где ν – частота колебаний $\nu = \frac{1}{T}$, T – период колебаний.

В таких условиях можно утверждать, что длина волны λ является интервалом периодичности колебаний в пространстве. Иначе говоря, *длина* волны – это минимальное расстояние между точками среды, имеющими одинаковую фазу движения колебания. При неподвижном источнике гармоническая бегущая волна является в тоже время и монохроматической, характеризуемой единственным значением λ для всех направлений распространения. Ситуация изменяется, если источник волн движется относительно среды (в которой он возбуждает волны) или если относительно среды перемещается наблюдатель, фиксирующий прохождение волн с помощью некоторого измерительного прибора (приемника). Тогда, при сохранении гармоничности колебаний, волна становится немонохроматичной. А именно, значение длины волны λ будет изменяться в зависимости от направлений и значений векторов скоростей движения источника и приемника волн.

Явление зависимости длины волны (и частоты) от относительного движения источника и приемника волн получило название *эффекта Доплера*.

Свяжем систему отсчета со средой, в которой распространяются гармонические волны. Например, это могут быть волны на поверхности жидкости (рис.1). Будем считать, что источник круговых волн располагается в точке I , а приемник – в точке P . Скорости движения источника волн и приемника обозначим v_i и v_p , начало координат расположено в произвольной точке O .

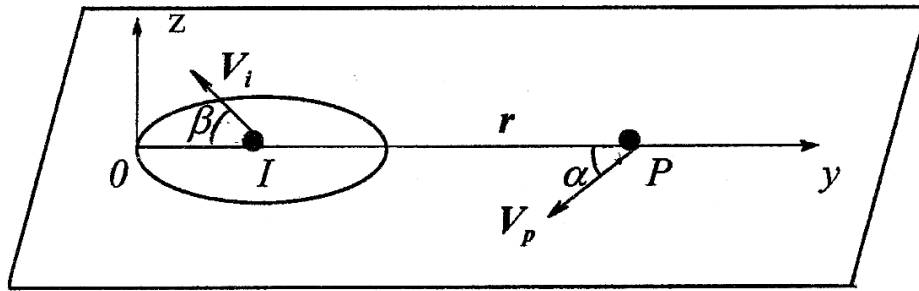


Рис. 1. Схема относительного движения источника и приемника волн.

Пусть r – радиус-вектор, соединяющий приемник P с источником волн I . Обозначим углы между векторами скоростей приемника v_p , источника v_i и вектором r через α и β . Тогда величина частоты ν' , регистрируемой приемником, будет равна :

$$\nu' = \nu \frac{1 + \frac{v_p}{v_\phi} \cos \alpha}{1 + \frac{v_i}{v_\phi} \sin \beta}, \quad (3)$$

где ν – собственная частота источника в системе отсчета, в которой он неподвижен. Более простыми являются случаи, когда, либо приемник, либо источник неподвижны относительно среды.

1. Движение приемника ($\alpha = 0$) относительно системы отсчета, в которой *источник неподвижен* ($v_i = 0$). Это классический случай, когда одно и то же явление рассматривается и описывается в двух инерциальных системах отсчета. И неподвижный наблюдатель, и движущийся фиксируют распространение колебаний в пространстве, то есть волны. Частота волн, равная числу приходящих волн за единицу времени для неподвижного наблюдателя определится фазовой скоростью волны v_ϕ . В подвижной системе отсчета приемник зарегистрирует большее число волн за единицу времени, так как по классическому закону преобразования скоростей (преобразования скоростей Галилея) в подвижной системе скорость волн будет равна ($v_\phi + v_p$). Из прямой пропорциональной зависимости следует соотношение:

$$\frac{\nu''}{\nu_0} = \frac{v_\phi + v_p}{v_\phi}.$$

Преобразуя, получим формулу (4):

$$v'' = v_0 \left(1 + \frac{v_p}{v_\phi} \right). \quad (4)$$

Легко видеть, что это частный случай формулы (3).

2. *Источник волн движется* относительно среды и неподвижного наблюдателя. Рассмотрим случай гармонической поперечной волны, распространяющейся от источника I , который *приближается* к приемнику по прямой ($\beta = \pi$). На рис. 2 представлен профиль волны, формируемый за время одного полного колебания при неподвижном источнике (пунктирная линия) и соответствующий профиль для равномерно движущегося источника (сплошная линия).

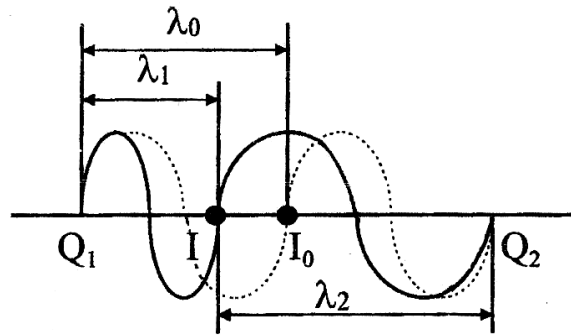


Рис.2. Профили волн от равномерно движущегося источника

Согласно определению длины волны, в случае подвижного источника величина λ_1 определится интервалом IQ_1 , а λ_2 – интервалом IQ_2 , так как отсчет пройденного волной расстояния мы должны произвести от положения источника по истечении времени T . За это время сам источник пройдет расстояние $I_0I = v_i T$. Поэтому, в направлении движения длина волны λ_i должна определяться соотношением (5):

$$\lambda_1 = \lambda_0 - v_i T = v_\phi T - v_i T = (v_\phi - v_i) T. \quad (5).$$

Частота, воспринимаемая приемником, определяется выражением (6):

$$v_1 = \frac{v_\phi}{\lambda_1} = \frac{v_\phi}{T(v_\phi - v_i)} = v_0 \frac{1}{\left(1 - \frac{v_i}{v_\phi} \right)}. \quad (6).$$

Если источник *удаляется* от наблюдателя, то следует изменить знак в (5) и (6):

$$\lambda_2 = \lambda_0 + v_i T = (v_\phi + v_i) T, \quad (5a)$$

$$v_2 = v_0 \frac{1}{\left(1 + \frac{v_i}{v_\phi}\right)}. \quad (6a)$$

Полученные формулы являются частными случаями формулы (3).

Таким образом, при движении источника, приемника или при их совместном перемещении в пространстве, значение длины волны изменяется и зависит от условий наблюдения. На первый взгляд, формулы для v' и v'' резко отличаются по функциональной зависимости и должны давать заметно различающиеся результаты. Это должно бы позволить определить, что к чему приближается: источник к неподвижному приемнику, или же наоборот, движется только приемник волн. При этом, собственная частота v_0 должна быть известна. Фактически, однако, значения v' и v'' отличаются незначительно, с погрешностью до членов второго и более высоких порядков малости отношения (v_i/v_ϕ) . Сравнение формул (4) и (6) дано в приложении.

Критическим случаем, при котором нарушается обычный режим бегущей гармонической волны, является *движение источника со скоростью, равной фазовой скорости волны*: $v_i = v_\phi$. Для неподвижного наблюдателя, от которого удаляется такой источник, по формуле (5a) и (6a) мы получим:

$$\lambda' = 2 \lambda_0 \quad \text{и} \quad v' = 0,5 v_0.$$

В этом направлении сохраняется обычное волновое движение. В то же время, для наблюдателя, к которому приближается источник волн получаются значения:

$$\lambda' = 0; \quad v' = \infty.$$

Очевидно, для этого направления волновой процесс становится аperiodическим. Пояснить ситуацию может рис. 3, на котором показаны положения гребней круговых волн на поверхности жидкости, проведенные для моментов времени $1T$, $2T$, $3T$, с начала движения. Последовательные положения источника для этих моментов отмечены как I_1 , I_2 , I_3 .

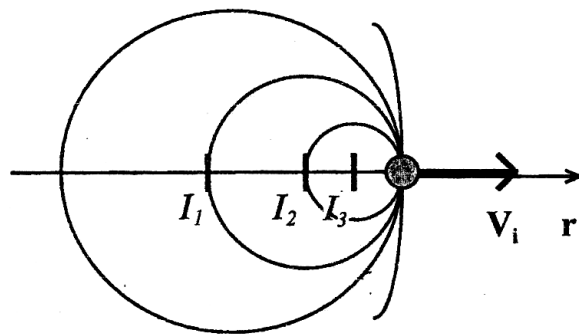


Рис.3. Волновые фронты при движении источника со скоростью, равной фазовой скорости волн

Физический смысл явления заключается в том, что в направлении r расходящиеся волны не могут обогнать источник и "оторваться" от него. По этой причине, в области источника накапливается большое число волн, общая огибающая которых постепенно расширяется все дальше от источника, но в направлении, перпендикулярном вектору скорости его движения. В результате формируется волновой фронт в виде закругленной на концах прямой, в центре которой находится источник.

В случае сферических волн, например, звуковых, будет формироваться плоский волновой фронт, несущий колебательную энергию многих молекул. Прохождение такого фронта наблюдается как *ударная волна*. В области ударной волны колебания, как правило, становятся нелинейными.

Рассмотрим теперь, как будет восприниматься эффект Доплера в системе отсчета, связанной с *движущимся источником волн*, например, с реактивным самолетом. С точки зрения летчика, среда "набегает" на самолет, как если бы он обдувался в аэродинамической трубе. В направлении полета, по вектору v_i длина звуковой волны будет меньше, чем в неподвижной среде, так как фронт волны сносится вместе со средой к источнику звука. Наоборот, в противоположном направлении фронт волны быстрее удаляется от источника, и длина волны возрастает. Можно описать распространение фазы поперечной волны по направлению вектора v_i и в противоположном, с помощью выражений (7) и (8):

$$\begin{aligned} y_1 &= y_{\max} \sin \omega t. & (7) \\ x_1 &= (v_{\phi} - v_i)t. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_2 &= y_1 & (8) \\ x_2 &= -(v_{\phi} + v_i)t. \end{aligned}$$

В случае $v_{\phi} = v_i$ из выражения (7) следует, что $x_1 = 0$ при любых значениях времени t . Это означает, что энергия колебаний, передаваемая среде, накапливается в области самого источника и создает для него ударную волну. Мы приходим к тем же выводам, что и при описании эффекта в неподвижной системе отсчета (связанной со средой).



Для звуковых волн в газовых средах фазовая скорость определяется по скорости распространения звука $v_{\phi} = v_{зв}$, и имеет величину порядка 1200 км/час, для обычных атмосферных условий. Современные реактивные самолеты могут летать со скоростью, превышающей эту величину. При сверхзвуковом движении источника звука – двигателя самолета (рис. 4, в) плоский волновой фронт бегущих сферических волн, о котором шла речь выше, преобразуется в конический. По имени австрийского физика доктора Эрнста Маха, который впервые исследовал данную проблему и первым описал случай движения источника с $v_i > v_{\phi}$. Такой фронт ударной волны называют *конусом Маха*.

Эрнст Мах (1838—1916) — австрийский физик, механик и философ-позитивист.

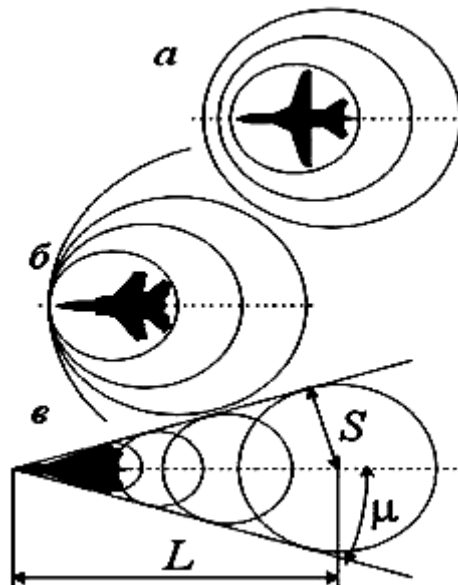


Рис. 4. Конус Маха.

Отдельные сферические фронты звуковых волн оказываются вложенными (вписанными) в конус Маха.

Но не на всякой высоте самолет, летящий со скоростью 1200 км/час, летит со скоростью звука. На высоте 1,5 км, например,

скорость звука уже не та, что на уровне моря, а на высоте 5 км она еще больше отличается от нее. Помимо этого, воздух на разных высотах имеет неодинаковую *плотность*, а поэтому и скорость самолета при прочих равных условиях также будет различной. Для определения соотношения между скоростью движущегося предмета и скоростью звука введено *число Маха*, определяемое по формуле

$$M = \frac{v}{v_{зв}},$$

где M – *число Маха*, v – *скорость самолета*, или «истинная воздушная скорость», и $v_{зв}$ – *скорость звука* на данной *высоте*.

Многие полагают, что изменение числа Маха вызывается различной плотностью воздуха на разных высотах. Отчасти это так, ибо с изменением плотности воздуха меняются и летные характеристики самолета. Но вообще скорость звука не имеет ничего общего с плотностью воздуха; она полностью зависит от температуры воздуха.

В соответствии с числом Маха авиационные инженеры делят все скорости движения в воздухе на три группы: *дозвуковые* (от $M = 0$ до $M = 0,8$), *околозвуковые* (от $M = 0,85$ до $M = 1,3$) и *сверхзвуковые* (свыше $M = 1,3$). На первый взгляд может показаться, что вполне достаточно делить все скорости на дозвуковые и сверхзвуковые. Однако введение промежуточной категории – околозвуковая скорость – совершенно необходимо. Дело в том, что вокруг тела, движущегося, скажем, со скоростью $M = 0,9$, поток воздуха может быть в некоторых точках сверхзвуковым, а в остальных – дозвуковым. Скорости второй категории можно назвать и скоростями смешанного потока, но слово «околозвуковая» является более коротким и терминологичным. При дозвуковой скорости воздух на пути самолета не сжимается им, подобно газу в замкнутом цилиндре, сжимаемому поршнем. Когда же скорость самолета становится сверхзвуковой, воздух не может уйти с его пути и действительно сжимается даже в открытом пространстве. Физики объясняют это тем, что при сверхзвуковой скорости полета область, находящаяся впереди снаряда или самолета, является «областью отсутствия звукового сигнала».

Эта «область отсутствия сигнала» лежит вне «конуса Маха» (рис. 4). За счет сжатия воздуха здесь, если можно так выразиться, создается источник колебаний, или «импульсная точка». До тех пор, пока эта «импульсная точка» неподвижна, возбуждаемые ею ударные волны распространяются концентрически, постепенно затухая. По мере удаления этих концентрических волн от «импульсной точки» их поверхность увеличивается, и они слабеют. Когда источник

колебаний начинает двигаться, сферы звуковых (несущих «сигнал») и ударных волн теряют концентрическую форму; «сигнал» замедляется. А когда скорость «импульсной точки» превысит скорость звука, «сигнал», то есть звуковая волна, отстанет от нее.

Но не только это отличает дозвуковые скорости полета от сверхзвуковых. Предположим, что воздух с дозвуковой скоростью проходит через трубу. Пока труба остается прямой, скорость потока не меняется. Но если сделать трубу постепенно уменьшающегося диаметра, то поток воздуха будет набирать скорость. Скорость потока может достигнуть $M = 1$, если наше сопло будет достаточно длинным. Сверхзвуковой поток в таком сопле, наоборот, замедляется. В расширяющемся (расходящемся) сопле дозвуковой поток замедляется, а сверхзвуковой – увеличивает скорость. Вот почему сопло ракетного двигателя сначала сходится, чтобы разогнать дозвуковой поток до скорости звука, а затем расширяется, чтобы максимально увеличить эффективную скорость истечения.

Для случая волн на поверхности жидкости можно привести рис. 5, на котором показаны положения нескольких круговых фронтов. Как видно из рис. 5, фронт ударной волны, как огибающая многих, должен являться касательной к окружностям.

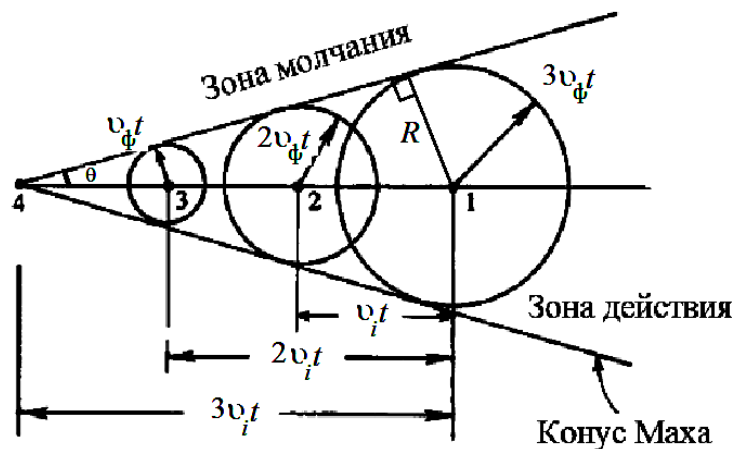


Рис. 5. Схема формирования конуса Маха

За одно и то же время источник пройдет путь $v_i t$, а волна распространится на меньшее расстояние $v_\phi t$. Легко определить угол конуса Маха:

$$\sin\theta = \frac{v_\phi}{v_i} = \frac{1}{M},$$

где M – число Маха, равное отношению скорости источника к фазовой скорости волн.

Из формулы видно, что конус Маха становится шире при уменьшении числа Маха и становится плоским фронтом ($\theta = 90^\circ$), когда число Маха равно единице.

В отличие от звуковых, электромагнитные волны (в том числе – световые) не требуют для своего движения какой-либо вещественной среды. Они могут возбуждаться в вакууме, где скорость их распространения равна $v_{\text{ф}} = c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Согласно теории относительности, движение источника не может изменить скорость распространения света и сферический фронт не меняет формы при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую. Поэтому, для продольного эффекта Доплера в случае световых волн получается одна общая формула (10):

$$v' = v_0 \left[1 \pm \frac{v}{c} + \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2 \pm \dots \right], \quad (10)$$

где v – скорость движения источника или приемника света. Знак плюс в скобках выбирается в случае сближения источника электромагнитных волн и их приемника, минус соответствует удалению источника от наблюдателя. В качестве примера можно указать, что эффект Доплера для электромагнитных излучений был использован для доказательства факта удаления других галактик от нашей.

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

Частота колебаний может соответствовать конкретным звуковым волнам, но для простоты можно задать ее равной одному, десяти или ста герцам. Для каждого значения следует подобрать шаг расчета ΔT кратный или просто равный периоду колебаний (или его половине).

Поскольку в формулы входит отношение скорости движения источника к фазовой скорости, следует либо задавать значение v_i , равное $0,1v_{\text{ф}}$, $0,5v_{\text{ф}}$ и т. п., либо положить $v_{\text{ф}} = 1$. Тогда значения v_i сразу будут выражать величину отношения скоростей.

В части 1 исследуются пространственные расположения волновых фронтов в неподвижной системе отсчета, фиксируемые через выбранные интервалы времени. При исполнении части 2 исследуются изменения профиля поперечных волн, наблюдаемые в инерциальной системе отсчета, связанной с движущимся источником волн.

Звуковое сопровождение.

При приближении источника звука мы слышим звук с частотой выше его собственного, при удалении – ниже. Пусть собственная частота источника равна 440 Гц (нота *Ля*). Чтобы почувствовать разницу тонов для случая движения Источника со скоростью, равной половине фазовой, введите в строке *звук источника* значение 1, при любых значениях других параметров. Тогда, перед появлением на экране результатов расчетов, Вы услышите сначала звук с частотой 660 Гц, затем с частотой 220 Гц.

Часть 1. Система отсчета, связанная со средой.

Задание 1. *Волновые фронты при неподвижном источнике.*

1. Введите следующие значения параметров:

$$R_0 = 0; W = 1 \text{ Гц}; F_0 = 0; A_i = 0; v_i = 0;$$

$$v_\phi = 1; M = 10; DT = 50 \text{ мс}; MT = 5 \text{ с}.$$

В этом случае на экране будут представлены положения волновых фронтов, представленные через промежуток времени, равный $0,05 T$.

2. Чтобы упростить картину, установите значение $DT = 500 \text{ мс}$. Теперь $DT = T/2$ и расстояния между окружностями равны половине длины волны. Величина длины волны будет равна расстоянию между первой и третьей окружностями. Измерьте это расстояние с помощью делений горизонтальной оси или линейки и запишите в отчет как λ_0 .

Задание 2. *Равномерное движение источника со скоростью $v_i < v_\phi$.*

1. Введите новые значения: $R_0 = -2,5$; $v_i = 0,2v_\phi$ и выполните измерения длины волны в направлении движения источника (к правому краю экрана) и в противоположном. Убедитесь, что в обоих случаях процесс остается периодическим (по равенству расстояний между фронтами).

Таблица 1. *Зависимость значений длины волны от скорости источника волн.*

Направление движения	Длина волны, отн. единицы, для v_i , равного						
	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,95	1,0
Сближение							
Удаление							

2. Последовательно изменяйте значение скорости v_i по ряду (0,4; 0,6; 0,8; 0,9; 1) v_{ϕ} . Измеренные величины длин волн запишите в табл. 1.

3. На основании полученных результатов, постройте график зависимости длин волн от величины отношения скоростей.

Задание 3. *Равномерное движение со скоростью $v_i > v_{\phi}$ (сверхзвуковое движение).*

1. Введите последовательно значения скорости движения источника звука, указанные в табл. 2. Для каждого случая измерьте величину R радиуса первого (наибольшего) волнового фронта и расстояние L (от 1 до точки 4 на рис. 5). По данным табл. 2 постройте график зависимости угла конуса Маха θ от величины числа Маха M . Его величина определяется формулой (11):

$$\theta = \arcsin(R/L) \quad (11)$$

Таблица 2. Зависимость величины угла конуса Маха θ от отношения скоростей $v_i/v_{\phi} = M$.

M	1,0	1,1	1,2	1,4	1,8	2,0	2,5	3,0
R								
L								
θ								

Часть 2. Система отсчета, связанная с движущимся источником.

Задание 4. *Профили волн при движении со скоростью, меньшей фазовой*

1. Установите значения:

$$x_0 = 1, v_0 = 1, A_1 = 0, F_i = 5, A_0 = 0,3,$$

$$v_f = 2, MG = MV = 1, DT = 1, MT = 5.$$

Параметр, который будет меняться: v_0 .

Шаг изменения: 0,5. Число кривых: 3.

Зарисуйте профили волн в отчет, на отдельные рисунки. Используйте клавишу "Pause" для временного прекращения построений на экране. Расчет возобновится при последующем нажатии любой другой клавиши.

Задание 5. *Движение со скоростью, превышающей фазовую*

1. Установите значения: $v_0 = 2,5$.

Остальные параметры оставьте без изменения.

Параметр, который будет меняться: любой.

Шаг изменения: произвольный. Число кривых: 1.

Зарисуйте наблюдаемые профили волн в отчет. Опишите в отчете, что происходит с величинами длин волн в данном случае.

Задание 6. Движение с ускорением.

Этот случай отражает реальный процесс разгона самолета и прохождения им так называемого "звукового барьера".

1. Установите следующие значения:

$x_0 = 0,5$, $v_0 = 1$, $A_i = 0,2$.

Параметр, который будет меняться: любой.

Шаг изменения: произвольный. Число кривых: 1.

Зарисуйте в отчет форму наблюдаемого профиля волн. Опишите, как развивается процесс распространения волны, первоначально бегущей вперед (как изменяется величина длины волны)

2. Сделайте вывод по работе.

Приложение. Сопоставление формул (4) и (6). Для случая, когда $(v_i/v_a) \ll 1$, то есть, $v_i \ll v_\phi$ зависимость (6) можно представить в виде ряда Тейлора по малому параметру (v_i/v_ϕ) :

$$\frac{v_0}{1 - \frac{v_i}{v_\phi}} = v_0 \left[1 + \frac{v_i}{v_\phi} - \frac{1}{2} \left(\frac{v_i}{v_\phi} \right)^2 + \dots \right].$$

В линейном приближении, пренебрегая членами второго и более высокого порядка малости, можно записать

$$v' = v_0 \left(1 - \frac{v_i}{v_\phi} \right),$$

что совпадает с выражением для v'' по формуле (4).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется, длиной волны?
2. Какова связь между длиной волны, скоростью, частотой и периодом?

3. Что такое фазовая и групповая скорости?
4. Что представляют собой звуковые волны в газах?
5. Что такое ультразвук и где он применяется?
6. Может ли звук распространяться в вакууме?
7. В чем суть явления Доплера, как его объяснить?
8. Вывести формулу доплеровского сдвига частоты.
9. Как можно использовать явление Доплера для определения скорости звука в воздухе?
10. Получите формулы для определения частоты фиксируемой приемником:
 - а) источник и приемник покоится;
 - б) источник покоится, а приемник приближается к источнику;
 - в) источник приближается к приемнику, а приемник покоится;
 - г) источник и приемник движутся относительно друг друга.
11. Когда наблюдается двойной эффект Доплера?
12. Выведите формулу для доплеровского сдвига частоты при двойном эффекте Доплера.
13. Почему при двойном эффекте Доплера наблюдаются биения?
14. Одинаков ли доплеровский сдвиг частоты при движении источника звука к приемнику в воде и в воздухе?
15. Наблюдается ли эффект Доплера, если скорость распространения волн и скорость источника (приемника) взаимно перпендикулярны?
16. Рассмотрите эффект Доплера для случая, когда источник или приемник движутся со сверхзвуковой скоростью.
17. Какое влияние оказывает скорость ветра на эффект Доплера?
18. Чему будет равен доплеровский сдвиг частоты, воспринимаемых покоящимся приемником, если источник колебаний от него удаляется?
19. Как определить частоту звука, воспринимаемую приемником, если источник звука и приемник движутся на встречу друг другу?
20. Как зависит скорость звука от температуры газа?
21. Запишите уравнение плоской звуковой волны в воздухе.

ГЛОССАРИЙ

1. **Бегущая гармоническая волна** – это процесс распространения гармонического колебательного движения.

2. **Волновой фронт** – поверхность, до которой дошёл волновой процесс к данному моменту времени. По форме волнового фронта выделяют простейшие волны: сферическую, плоскую, цилиндрическую. Нормаль к волновому фронту совпадает с направлением распространения волны в данной точке.

3. **Двойной эффект Доплера** – изменение частоты волн при отражении их от движущихся тел, поскольку отражающий объект можно рассматривать как приемник, а затем как переизлучатель волн.

4. **Длина волны** – это минимальное расстояние между точками среды, имеющими одинаковую фазу движения колебания. Или **длина волны** – это пространственный интервал (расстояние) на котором происходит одно полное гармоническое колебание.

5. **Конус Маха** – коническая поверхность, ограничивающая в сверхзвуковом потоке газа область, в которой сосредоточены возмущения (звуковые волны), порожденные точечным источником возмущений — телом, обтекаемым потоком или, что эквивалентно, движущимся в среде со сверхзвуковой скоростью; конус Маха разграничивает возмущенную и невозмущенную области среды.

6. **Период колебаний** – наименьший промежуток времени, за который осциллятор совершает одно полное **колебание** (то есть возвращается в то же состояние, в котором он находился в первоначальный момент, выбранный произвольно).

7. **Ударная волна** — это распространяющийся по среде фронт резкого, почти мгновенного, изменения параметров среды: давления, плотности, температуры и скорости. Ударные волны также называют сильными разрывами или скачками. Причины возникновения ударных волн в газах – полеты со сверхзвуковыми скоростями (звуковой удар), истечения с большими через сопла, мощные взрывы, электрические разряды, интенсивное горение.

8. **Эффект Доплера** – явление зависимости длины волны (и частоты) от относительного движения источника и приемника волн получило название.

9. **Фазовая скорость движения волны** – скорость перемещения точки, обладающей постоянной фазой колебательного движения в пространстве, вдоль заданного направления. Обычно рассматривают

направление, совпадающее с направлением волнового вектора, и фазовой называют скоростью, измеренную именно в этом направлении, если противное не указано явно (то есть если явно не указано направление, отличное от направления волнового вектора). Фазовая скорость по направлению волнового вектора совпадает со скоростью движения фазового фронта (поверхности постоянной фазы).

10. **Число Маха** – отношение скорости тела или текучей среды (газа или жидкости) к скорости звука в окружающей среде. Таким образом, число Маха, равное 1, выражает локальную скорость звука. Самолет, летящий со скоростью ниже 1 Маха, считается дозвуковым, т.е. летящим со скоростью меньше скорости звука. Сверхзвуковой полет означает полет со скоростью выше 1 Маха.