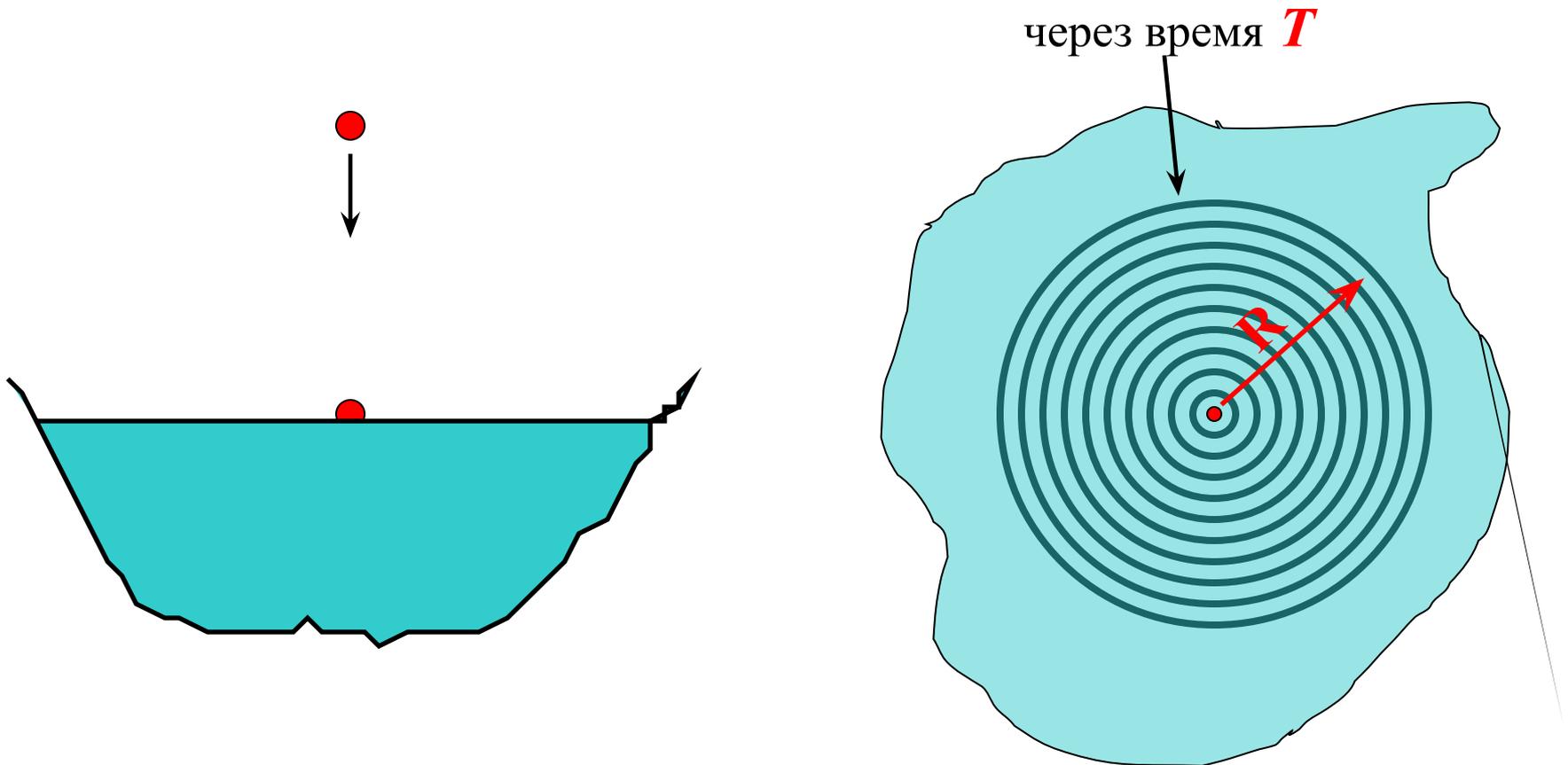


22 сентября 2007 года

- Изучаем круги на воде,
- знакомимся с эффектом Доплера,
- отвечаем на вопросы:
 - что такое звук и
 - сверхзвуковой “хлопок” ?

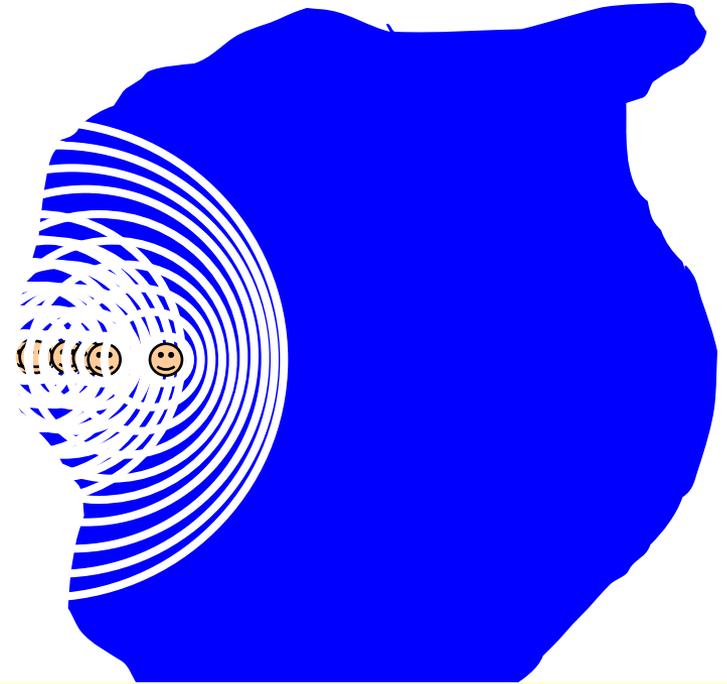
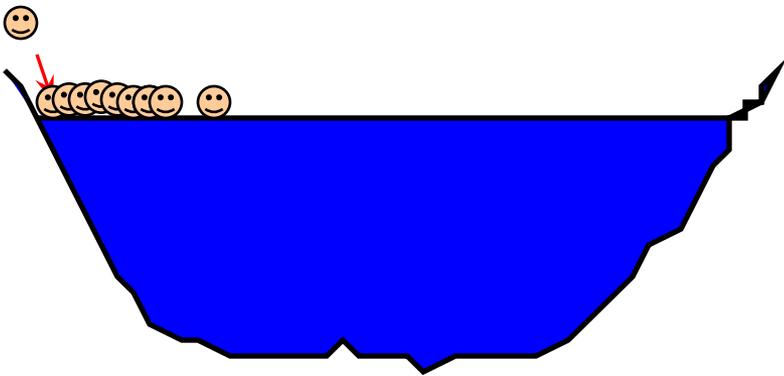
Волны на воде от брошенного сверху мяча



Скорость распространения волны, $V=R / T$

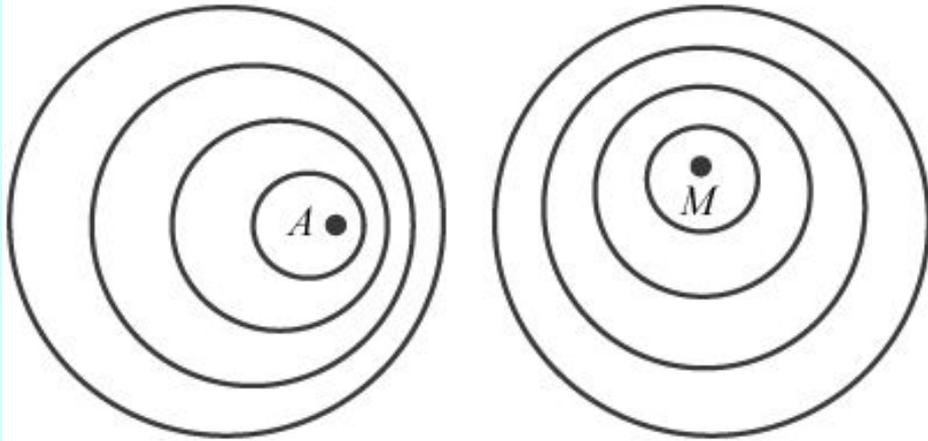
Скорость волны одинакова по всем направлениям; Поэтому волна и является окружностью: от той точки, где она возникла (центра окружности), она прошла по всем направлениям одинаковое расстояние. Центр этой окружности и есть место падения мяча.

Плывём со скоростью, **меньшей** скорости волн



Каждая волна создается пловцом. Очевидно, центры всех окружностей совпадают с последовательными положениями пловца. Центр самой большой окружности совпадает с первоначальным положением пловца. Оценим теперь качественно картину волн в зависимости от скорости пловца. Если пловец барахтается на месте, он создает концентрические кольца волн. Если он движется, то волны сгущаются в том направлении, куда он плывет, и разрежаются в противоположном направлении. Сгущение тем сильнее, чем больше скорость пловца.

Два пловца в одном озере



«снимок» глади озера сверху.

Точки – пловцы, окружности – волны.

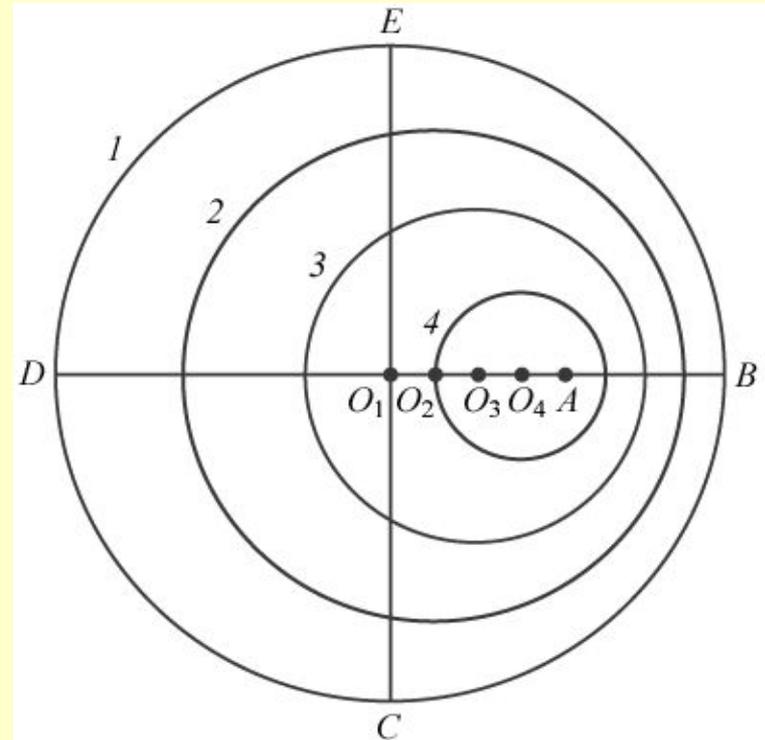
Рассмотрим движение пловца А. Центр самой большой окружности O_1 изображает первоначальное положение пловца.

Следовательно, пловец А плывет вправо, пловец М – вперед (на чертеже – вверх). За время, за которое пловец проплыл из точки O_1 в А, волна 1 прошла расстояние O_1B , которое, как следует из измерений по рисунку, вдвое больше расстояния O_1A . Следовательно, скорость пловца А вдвое меньше скорости волны, т.е. равна $0,25$ м/с. Аналогично измеряем скорость пловца М. Она еще меньше – $0,125$ м/с.

Куда плывут пловцы?

Какой из пловцов плывет быстрее?

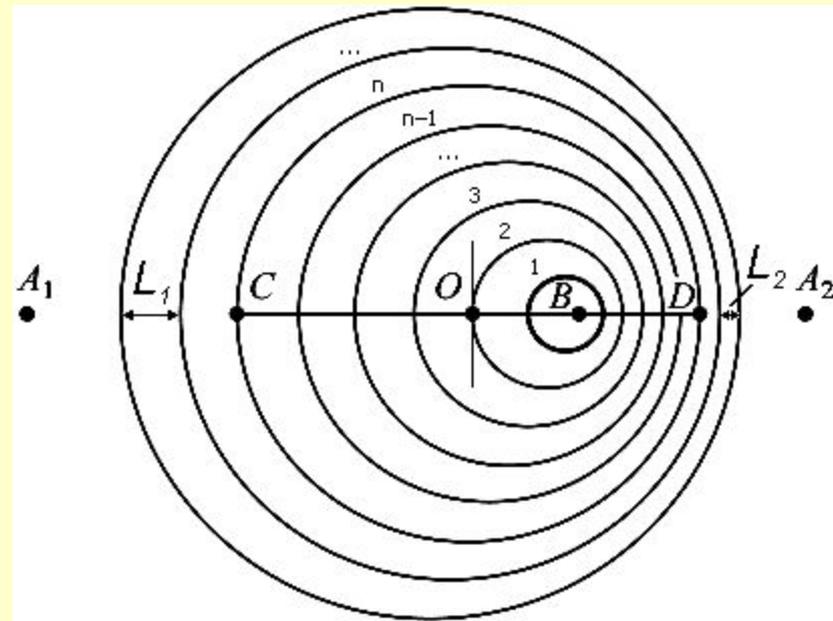
Какова скорость пловцов, если скорость волн $0,5$ м/с?



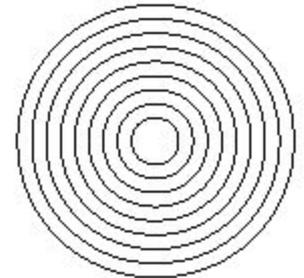
Эффект Доплера в обычном озере

Пусть впереди и позади пловца B на воде лежат поплавки A_1 и A_2 , покачивающиеся на проходящих под ними со скоростью V_B перенумерованных волнах.

- С какой частотой колеблется каждый из поплавков, если пловец создает F волн в секунду (взмах рукой каждые $1/F$ сек)?
- Как меняется частота колебаний поплавков, если изменяется скорость пловца V_n , а частота взмахов рук остается прежней?



Если пловец машет ритмично руками, но стоит на месте, то он является источником концентрических волн, и расстояние между соседними гребнями волн (длина волны, L) остаётся одинаковым во всех направлениях, $L = V_B / F$. Когда пловец начинает двигаться, то длина волны впереди него, L_2 , уменьшается, а позади, L_1 - увеличивается (см. верхний рисунок).



Очевидно, что $L_1 = V_B / F + V_n / F$, а $L_2 = V_B / F - V_n / F$. А, так как скорость распространения волн впереди и сзади пловца одна и та же (V_B), то поплавок A_1 будет вздрагивать каждые L_1 / V_B сек, а поплавок A_2 - L_2 / V_B сек. Поэтому, частоты колебаний поплавков A_1 и A_2 будут равны:

$$f_1 = F \cdot \frac{V_B}{V_B + V_n}$$

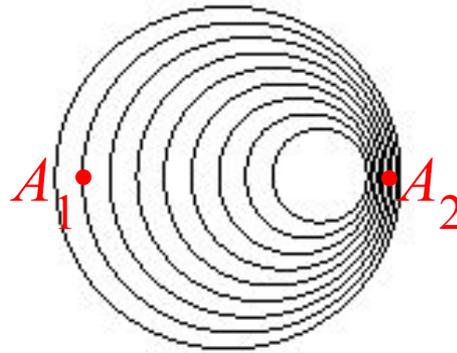
$$f_2 = F \cdot \frac{V_B}{V_B - V_n}$$

эффект
Доплера

Эффект Доплера в обычном озере (от формул к цифрам)

$$f_1 = F \cdot \frac{V_B}{V_B + V_{\Pi}}$$

$$f_2 = F \cdot \frac{V_B}{V_B - V_{\Pi}}$$



Пусть, $F = 2 \text{ Гц}$, $V_B = 0,5 \text{ м/с}$, $V_{\Pi} = 0,3 \text{ м/с}$, тогда

$$f_1 = 1,25 \text{ Гц}, \text{ а } f_2 = 5 \text{ Гц}$$

Подводим итоги! Частота колебаний поплавка A_1 , от которого источник колебаний (пловец) удаляется, ниже частоты колебаний F источника. Частота колебаний f_2 поплавка A_2 , к которому источник колебаний приближается, выше частоты колебаний источника. Это явление представляет собой не что иное, как известный из других областей физики эффект Доплера. Сам Доплер открыл его в акустике: тон гудка паровоза выше, пока паровоз приближается к наблюдателю, но сразу же понижается, когда паровоз, пройдя мимо наблюдателя, начинает удаляться от него.

Применение эффекта Доплера

Эффект Доплера имеет место в любом случае, когда источник периодических сигналов и приемник движутся друг относительно друга. Наиболее широкое практическое применение эффект Доплера получил в акустике, оптике и радиотехнике. Астрономы по доплеровскому смещению линий спектра определяют скорости движения звезд и межзвездных облаков водорода. Радисты по доплеровскому изменению частоты сигналов передатчика спутника определяют его скорость, направление полета и расстояние, на котором он пролетает.

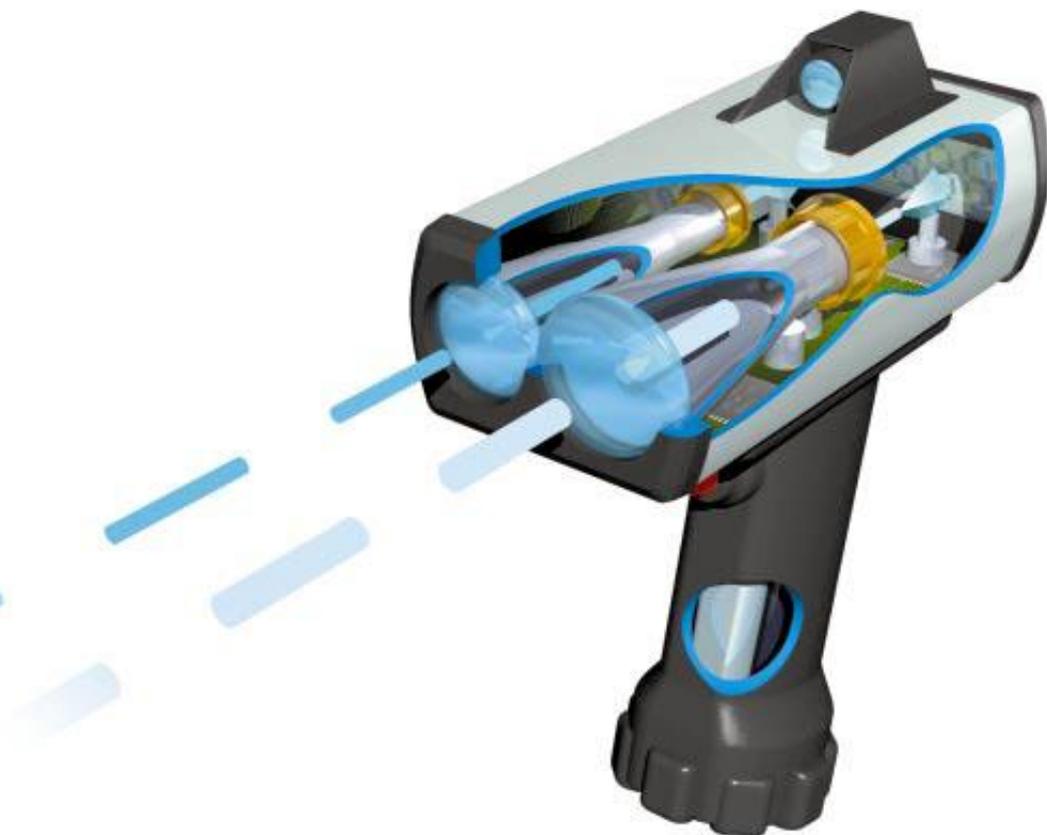
Сигнал, посылаемый радиолокатором на самолет, отразившись от него, возвращается в радиолокатор с удвоенным доплеровским сдвигом частоты (частота сдвигается при прохождении сигнала к цели и обратно). Сравнивая частоту посланного радиосигнала с частотой принятого отраженного, определяют скорость самолета. Радиолокатор может быть расположен на самолете и облучать земную поверхность. Тогда по доплеровскому сдвигу отраженного сигнала на самолете определяют собственную скорость относительно земной поверхности.

Эффект Доплера на службе у ДПС

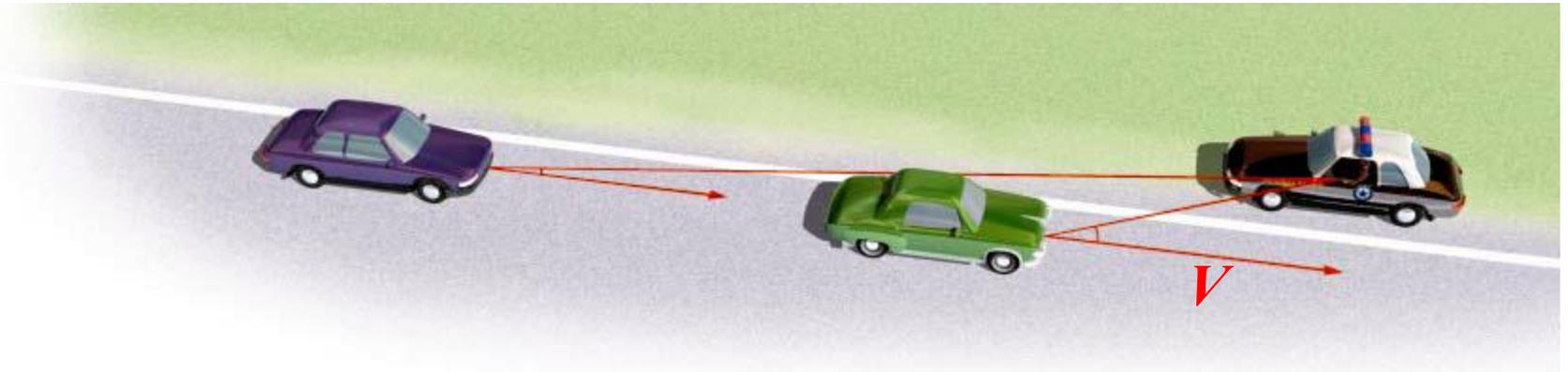
Радарная “пушка”, излучающая расходящийся пучок (60 м на длине 300 м) микроволн с длиной волны около 1 см, способна определять **среднюю** скорость машин, двигающихся на расстоянии до 1 км. **Туман, дождь и снег не мешают** работе радарной пушки.



Лазерная “пушка”, излучающая очень узкий (1 м на длине 300 м) пучок инфракрасного света с длиной волны около 1 мкм, способна определять скорость **одной** машины, двигающейся в потоке. **Туман, дождь и снег мешают** работе лазерной пушки.



Эффект Доплера на службе у водителей



Чем больше угол между вектором скорости V автомобиля и направлением на машину ДПС, тем меньше скорость, регистрируемая «пушкой». Почему?

Уловка нарушителей правил дорожного движения:

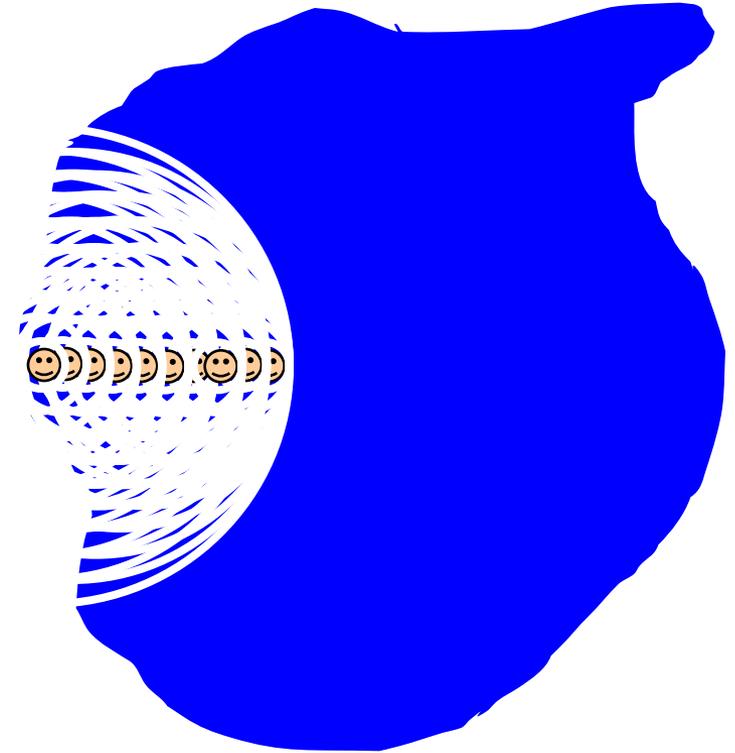
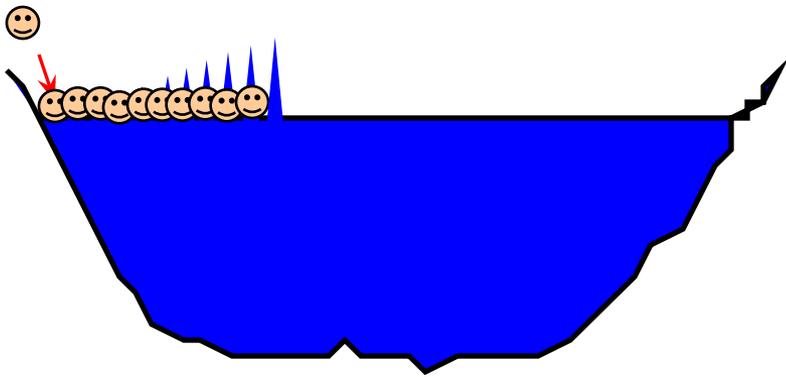
Так как частота, на которой работают «пушки», как правило одна и та же, то её можно обмануть, если на автомобиле установить специальный генератор электромагнитного сигнала, частота которого увеличена, по сравнению с «пушечным» на величину, соответствующую (по формуле Доплера) 60 км/ч. Тогда на «пушку» будет поступать два сигнала - отражённый от машины (соответствующий реальной скорости машины) и от спецгенератора. Но сигнал от спецгенератора можно сделать таким мощным, что «пушка» своего сигнала не почувствует, и нарушитель мимо сотрудников ДПС будет «проноситься всегда со скоростью 60 км/ч»

Почему президент уволил министра?

Домашнее задание

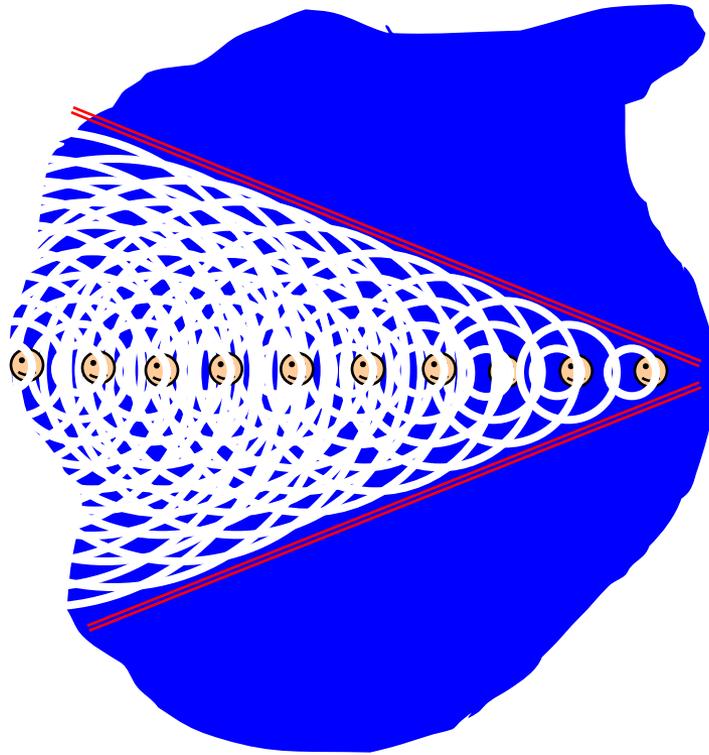
Президент поехал на поезде со скоростью 120 км/ч через всю страну и попросил своего министра каждые два часа сбрасывать ему с самолёта срочные секретные депеши из Москвы. Министр каждые два часа отправлял из Москвы правительственные самолёты (скорость, 600 км/ч) с секретными депешами, но президент после прибытия во Владивосток его уволил за то, что получал эти депеши не каждые 2 часа, а реже. Кто виноват в увольнении министра?

Плывём через пруд со скоростью **ВОЛН**



Волны сгущаются в том направлении, куда плывет пловец, и разрежаются в противоположном направлении. Сгущение тем сильнее, чем больше скорость пловца. Так будет до тех пор, пока скорость пловца не сравняется со скоростью волн. Тогда все окружности – большие и малые – касаются друг друга в одной точке, а именно в той, в которой находится пловец (см. на ВЫСОКУЮ волну).

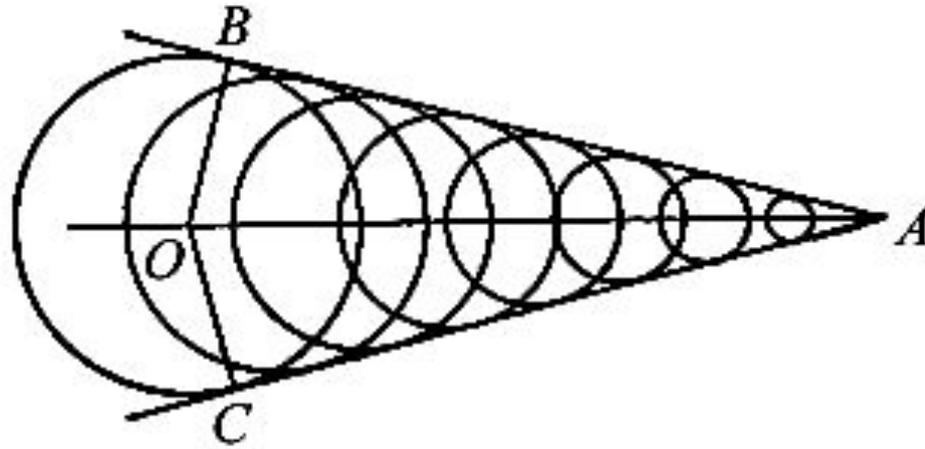
Плывём через пруд со **сверхволновой** скоростью



Не напоминает ли вам это **волны от быстрого катера?**

Если пловец движется быстрее волн, то картина оказывается сложнее. Наиболее отчетливо в ней виден клин из двух прямых волн – **общих касательных** ко всем круговым волнам. Внутри же клина картина очень запутана: здесь в отдельных местах гребень одной волны складывается с гребнем другой и получается более высокий гребень, в других же местах складываются две впадины, в третьих – гребень одной с впадиной другой. И только на **общих касательных** мы имеем простую картину: вдоль этих прямых выстроились гребни всех кольцевых волн.

Плывём через пруд со **сверхволновой** скоростью



Построив точку старта O и соединив ее с A и B , мы получаем прямоугольный треугольник OAB , у которого гипотенуза OA изображает путь, пройденный пловцом, а катет OB – путь, пройденный волной за то же время t . Если обозначить угол BAC буквой α , то $OB/OA = \sin(\alpha/2)$. Разделив числитель и знаменатель левой части на t , мы получаем слева отношение скоростей волны v_B и пловца v_{Π} . Таким образом, скорость пловца можно найти по формуле

$$v_{\Pi} = v_B / \sin(\alpha/2).$$

Чем острее клин (меньше α), тем больше скорость пловца.

Звук - волны, которые мы **СЛЫШИМ**



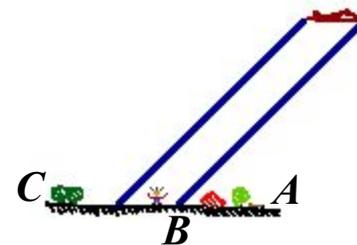
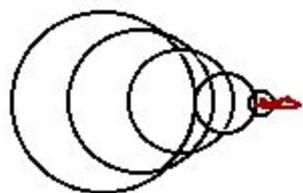
Смотрим
анимацию

Сверхзвуковой полёт

Клин звуковых волн создается у самолета, летящего со скоростью, большей скорости звуковых волн (со сверхзвуковой скоростью; отношение скорости самолёта к скорости звука - **число Маха**). Этот клин (точнее, поверхность конуса, поскольку в этом случае речь идет о движении волн в среде с тремя измерениями), набега на наблюдателя, создает у него впечатление орудийного выстрела, после которого наблюдатель, находясь уже внутри конуса, начинает слышать обычный звук самолета. На поверхности конуса давление выше, чем снаружи и внутри. Вблизи самолета перепад давления может достигать значительной величины, зависящей от высоты полета, типа машины, ее скорости; поэтому ударная волна низко летящего сверхзвукового самолета может произвести заметные разрушения. Но при высоте полета более 10 км волна достигает земли с давлением, превышающим атмосферное не более чем на доли процента. Часто удается различить, что «выстрел» двойной: второй удар происходит от хвостовой волны, где давление ниже, чем впереди самолёта.

Земной наблюдатель **A** может видеть самолет в зените, но не слышать его звука; на наблюдателя **B** в данный момент набегае поверхность конуса с повышенным давлением, и он слышит «выстрел». Наблюдатель **C** находится внутри конуса, он слышал «выстрел» раньше, а сейчас слышит обычный гул самолета.

То, что вы услышали сверхзвуковой хлопок вовсе не значит, что самолёт преодолел звуковой барьер прямо над вами!



Сверхзвуковой полёт

Скорость звука составляет ок. 1220 км/ч на уровне моря и примерно 1060 км/ч на высотах 10–30 км. Говоря о наличии «звукового барьера», некоторые конструкторы считали, что самолет никогда не полетит быстрее скорости звука из-за вибраций конструкции, которые неизбежно разрушат самолет. Некоторые из первых реактивных самолетов действительно разрушились при приближении к скорости звука. К счастью, результаты летных испытаний и быстрое накопление опыта проектирования позволили устранить возникшие проблемы, и «барьер», казавшийся когда-то непреодолимым, в наши дни потерял свое значение. При надлежащем выборе компоновки самолета удастся уменьшить вредные аэродинамические силы и, в частности, сопротивление в диапазоне перехода от дозвуковых скоростей к сверхзвуковым, вследствие этого достигается плавное обтекание области стыка крыла с фюзеляжем и снижается лобовое сопротивление. На самолетах, скорости которых заметно превышают скорость звука, используются крылья большой стреловидности и фюзеляж большого удлинения.

Первые сверхзвуковые самолёты США и СССР

14 октября 1947 года в США на самолёте Х-1 был впервые преодолен звуковой барьер. В сентябре 1948 г. начались заводские испытания опытного истребителя Ла-176. Новый истребитель по расчетам конструкторов должен был развивать скорость, вплотную приближающуюся к звуковой. Чтобы достигнуть этого, крылу и оперению «176» придали стреловидность большую, чем у любого другого боевого самолета того времени. Увеличение угла стреловидности почти на 8° по сравнению с «168» оказалось качественно новой ступенью в развитии аэродинамической компоновки скоростного самолета. 26 декабря 1948 г. на высоте 9060 м впервые в СССР была преодолена скорость звука.



Дозвуковой самолёт (без стреловидности крыла)



Сверхзвуковые самолёты с большой стреловидностью крыла



Самолёт преодолевает звуковой барьер



Перестаёт ли слышать шум
двигателя пилот после того, как
преодолеывает звуковой «барьер»?

Вопросы для повторения:

- Как определить скорость распространения волн по воде?
- Как меняется картина волн при движении пловца?
- Что такое эффект Доплера, и где он применяется?
- Что образуется перед источником волн, когда его скорость приближается к скорости распространения волн?
- Какой вид имеет картина волн при движении источника со скоростью выше скорости волн?
- Что такое звук?
- Что такое число Маха?
- Когда был преодолён звуковой барьер скорости?
- Что такое сверхзвуковой щелчок, и чему он соответствует?