

Или в безразмерном виде:

$$\frac{v'}{v} = \frac{1}{1 - v/c}. \quad (2)$$

На рисунке 2 изображены графики, соответствующие выражениям (2) и (1). Отметим характерные особенности кривых *AB* и *ED*.

При  $v/c = 0$  (источник и приемник неподвижны относительно воздуха) частота звука не искажается:  $v' = v$ . При

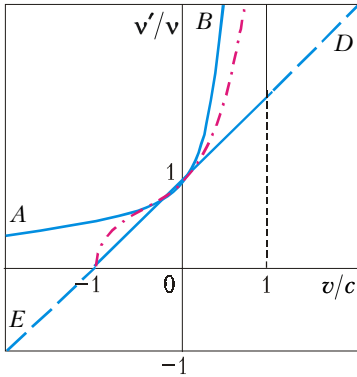


Рис. 2

$v/c \rightarrow 1$  (кривая *1B*) источник все быстрее налетает на приемник, частота звука растет: бас, излучаемый источником, воспринимается как комариный писк, при еще больших скоростях становится ультразвуком, а при  $v \geq c$  уже не достигает источника – невозможно, например, услышать сверхзвуковой самолет, пока он не долетит до приемника лично. Если же  $v/c$  становится

отрицательной величиной, т.е. источник звука удаляется от приемника (кривая *A1*), воспринимаемый звук оказывается ниже испускаемого.

В случае приближения приемника к источнику звука частота принимаемого звука растет (участок *1D*), в случае удаления – падает, причем в этом последнем случае улетающий приемник будет обгонять волны в обратном порядке (см. штриховой участок прямой *1E* при  $v/c < -1$ ). Конечно, в окрестностях точек  $v/c = \pm 1$  должно происходить еще что-то интересное – ведь в воздухе перед приемником может возникнуть скачок уплотнения, который должны будут преодолевать звуковые волны прежде чем попасть в регистрирующий их приемник, так что потребуются уточнение теории. Ибо в этом скачке все параметры газа (давление, температура и плотность) отличаются от атмосферных.

Посмотрим, как на деле «работают» полученные формулы. Пусть по мосту через пропасть между двумя участками туннеля движется поезд (рис.3) со скоростью  $v$ , а его свисток излучает звук частотой  $v$ . Прежде всего, согласно формулам (1) и (2), неподвижные наблюдатели Антон (*A*) и Борис (*B*) будут воспринимать звуки с частотами  $v_{A1} = v/(1 - v/c)$  и  $v_{B1} = v(1 - v/c)$ . Эти три частоты изображены на рисунке 3 вверху в виде отрезков, высота которых качественно

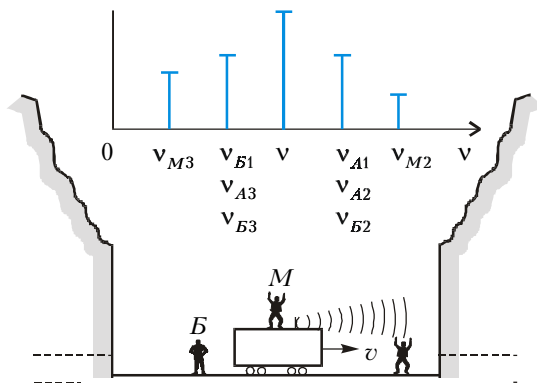


Рис. 3

характеризует интенсивность звука. Ясно, что для наблюдателей *A* и *B* эта интенсивность меньше, чем для машинистки Маши (*M*) – просто оттого, что звуковые «лучи» расходятся во все стороны. Дойдя до стенок туннеля (предполагаем, что они вертикальны), звуковые волны отражаются, и их, в принципе, могут зарегистрировать все три наблюдателя. Волны, отраженные от правой стенки, придут к *A*, *B* и *M* с частотами  $v_{A2} = v_{A1}$ ,  $v_{B2} = v_{B1}$  и  $v_{M2} = v(1 + v/c)/(1 - v/c)$ , потому что эта правая стенка служит как бы излучателем звука частотой  $v_{A1} = v/(1 - v/c)$ . Левая стенка служит излучателем звука частотой  $v_{B1} = v(1 - v/c)$  и снабжает неподвижных слушателей звуками той же частоты:  $v_{A3} = v_{B1}$ ,  $v_{B3} = v_{B1}$ , а удаляющийся от этой стенки наблюдатель *M* услышит звук частотой  $v_{M3} = v(1 - v/c)/(1 + v/c)$ .

Учитывая многократные отражения свистка паровоза от вертикальных стенок туннеля, вдумчивый читатель может самостоятельно обогатить палитру звуков, воспринимаемых тремя наблюдателями.

Выше уже было упомянуто, что частота принимаемого звука совпадает с частотой излучаемого ( $v' = v$ ), только если приемник и источник неподвижны относительно воздуха; подчеркнем здесь еще раз – именно относительно воздуха, а не относительно друг друга. Действительно, если, например, источник движется за приемником вправо и оба они движутся со скоростью звука (следовательно, их относительная скорость равна нулю), то излучаемый звук никогда не достигнет приемника – где уж тут говорить о неискаженной частоте! Это происходит потому, что звуковые волны распространяются в материальной среде, обладающей инертностью (и упругостью). В этом случае важно подчеркивать, что движется относительно среды – приемник или излучатель волн, поэтому выше и получились различные формулы для принимаемой частоты.

Другое дело – оптика. Тут определяющую роль играет именно относительная скорость  $V$  приемника и источника. Не вдаваясь в тонкости преобразований Лоренца, приведем окончательный результат:

$$\frac{v'}{v} = \frac{1 \pm V/c}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}. \quad (3)$$

Здесь знак «плюс» соответствует случаю сближения приемника и излучателя электромагнитных волн, «минус» – удаления их друг от друга,  $c$  – теперь уже скорость света (а не звука), а для относительной скорости специально использована другая буква, а именно  $V$  (а не  $v$ ), чтобы еще раз подчеркнуть отличие оптики от акустики.

Соответствующая выражению (3) кривая изображена на рисунке 2 штрих-пунктиром (тут-то и видна польза безразмерных переменных: и оптика и акустика уместились на одном графике, хотя масштабы скоростей распространения световых и звуковых волн отличаются в миллион раз). Видно, в частности, что, если скорости  $v$  или  $V$  малы (по сравнению со своим «масштабом»  $c$ ), то формулы для относительного сдвига частот звуковых и электромагнитных волн одинаковы:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{v' - v}{v} \approx \frac{v}{c} \text{ или } \frac{V}{c}. \quad (4)$$

Эта приближенная формула является самой простой оценкой доплеровского сдвига частот, причем как в акустике, так и в оптике. Теперь ясно, например, что из-за вращения Солнца один край его диаметра (движущийся к нам) должен быть синее, а другой (уходящий от нас) – краснее, чем центр его диска. И если мы обладаем достаточно чувствительным