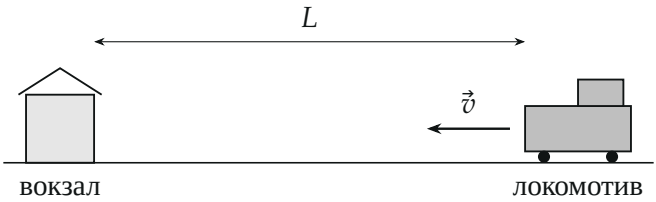
Свисток приближающегося локомотива

Задача 3. [Курчатов 2020/21, 7 класс, задача 3] Локомотив приближается к вокзалу с постоянной скоростью, двигаясь по линейному участку пути. Машинист даёт свисток в течение фиксированного промежутка времени $t_0 = 10$ с, но диспетчер вокзала, ожидающий поезд, измеряет время доносящегося до него свиста как $t_1 = 9$ с. Найдите скорость поезда v. Скорость звука в воздухе $c = 340$ м/с.

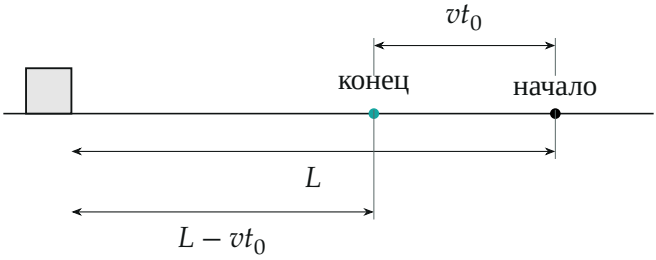


Поясняющий рисунок: локомотив начинает свисток на расстоянии L от вокзала.

▲ **Решение. Что происходит.** Задача на равномерное движение звука и поезда (по сути — эффект Доплера). Свисток длится t_0, но начало и конец свистка звучат из *разных* точек: конец — ближе к вокзалу на vt_0, ведь поезд за время свистка подъехал. Звуку от конца свистка лететь меньше, поэтому диспетчер слышит свист короче, чем он длился. Разница времён полёта звука — и есть $t_0 - t_1$.

Обозначения. L — расстояние от локомотива до вокзала в начале свистка (рисунок 1); τ_A и τ_B — время полёта звука от начала и от конца свистка; момент начала свистка — 0.

1. Где начинается и где кончается свисток. Поезд едет равномерно, за время свистка он проходит vt_0. Начало свистка звучит на расстоянии L от вокзала, конец — на расстоянии $L - vt_0$ (рисунок 2).



Точки, где начался и где закончился свисток: за время t_0 поезд приблизился на vt_0.

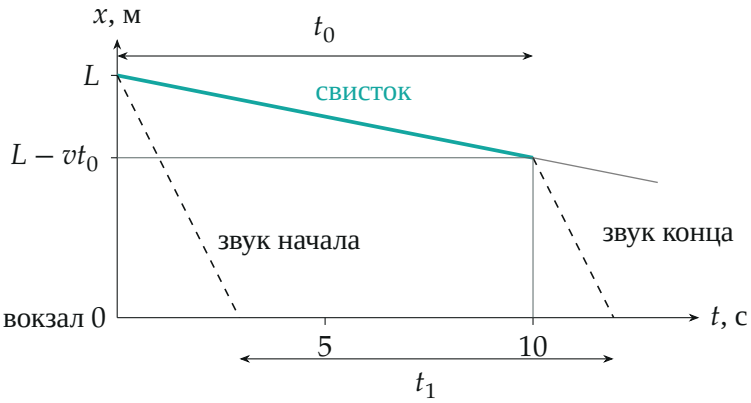
2. Время полёта звука. Звук идёт к вокзалу равномерно со скоростью c (относительно воздуха, воздух неподвижен):

$$\tau_A = \frac{L}{c}, \qquad \tau_B = \frac{L - vt_0}{c}.$$

3. Что слышит диспетчер. Начало свистка он слышит в момент τ_A, конец — в момент $t_0 + \tau_B$ (рисунок 3). Слышимая длительность

$$t_1 = (t_0 + \tau_B) - \tau_A = t_0 - \frac{vt_0}{c} = t_0\left(1 - \frac{v}{c}\right).$$

L сократилось — ответ не зависит от того, где начался свисток.



Графики движения (для примера $L = 1000$ м, $v = 34$ м/с): поезд — серая

линия, свисток — бирюзовый участок, звук — пунктир. Звук конца свистка летит меньше, поэтому $t_1 < t_0$.

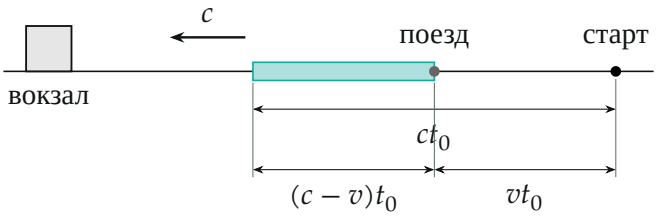
4. Скорость поезда. Из $t_1 = t_0(1 - v/c)$:

$$v = c\,\frac{t_0 - t_1}{t_0} = 340 \cdot \frac{10 - 9}{10} = 34 \text{ м/с}.$$

5. Второй способ — длина «звукового отрезка». В момент конца свистка звук начала свистка ушёл от точки старта на ct_0 к вокзалу, а поезд — на vt_0. Весь свист в воздухе — отрезок длиной $(c - v)t_0$ (рисунок 4). Он движется к вокзалу со скоростью c и проходит мимо диспетчера за

$$t_1 = \frac{(c - v)t_0}{c} \quad \Rightarrow \quad v = c\,\frac{t_0 - t_1}{t_0},$$

то же самое.



Момент конца свистка: весь свист — бирюзовый отрезок воздуха длиной $(c - v)t_0$, бегущий к вокзалу со скоростью c (масштаб условный).

Обратите внимание. Скорость звука — относительно воздуха, а не поезда: звук от конца свистка не летит «быстрее» оттого, что поезд едет. Сокращение времени даёт только то, что конец свистка звучит ближе.

Проверка. Размерность: м/с. Пределы: при $t_1 = t_0$ поезд стоит, $v = 0$; если бы $v \to c$, то $t_1 \to 0$ — весь свист пришёл бы одновременно (звуковой «удар»). Числа на рисунке 3: $\tau_A = 2{,}94$ с, $t_0 + \tau_B = 11{,}94$ с, разность 9 с.

Ответ. $v = c\,\dfrac{t_0 - t_1}{t_0} = 34$ м/с.