

СЕКЦИЯ 5 ВАКУУМНО-ЛЕВИТАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Аэродинамическое сопротивление движению скоростного поезда в вакуумной трубе

С.Б. Нестеров, А.И. Холопкин, Р.О. Кондратенко
Москва. Российское научно-техническое вакуумное общество им. академика
С.А.Векшинского.
E-mail: holopkinai@mail.ru

В работе проведена теоретическая оценка аэродинамического сопротивления движению скоростного поезда при разгоне в широком диапазоне давлений в вакуумной трубе. Найдены распределения скорости и давления воздуха вдоль трубы в зависимости от времени. Рассчитана величина времени, при котором происходит образование слабой ударной волны. Показано, что рассчитанная мощность поезда превышает мощность, найденную по оценочным формулам Ньютона.

Aerodynamic Resistance to Movement of a High-Speed Train in a Vacuum pipe. S.B. Nesterov, A.I. Holopkin, R.O. Kondratenko. The paper presents a theoretical evaluation of the aerodynamic resistance to movement of high-speed train during acceleration in a wide range of pressures in the vacuum tube. The distributions of air velocity and pressure along the pipe depending on time and the time necessary for the formation of weak shock wave were calculated. It was shown that the calculated power of the train was higher than the power estimated by the formula of Newton.

Движение поезда в трубе можно представить, как движение поршня создающее простую волну в политропном газе [1]. Политропный газ характеризуется соотношением $p \cdot V^\gamma = \text{const}$, где p – давление, V – объем, $\gamma = C_p/C_v$ – отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме соответственно. Для двухатомного газа (воздуха) $\gamma = 7/5$. Возможность применение формул, характеризующих движение газа перед поршнем и за поршнем, связано с тем, что длина свободного пробега молекул газа в рассматриваемом диапазоне давлений $10^5 - 10^{-1}$ Па гораздо меньше диаметра трубы.

Пусть поршень в момент $t = 0$ начинает двигаться с ускорением по закону $x = X(t)$:

$$X(t) = U_p \cdot \left[t - \tau_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) \right] \quad (1)$$

где U_p – установившаяся скорость поршня, а τ_p – постоянная времени.

В этом случае скорость движения поршня равна $v(t) = dX(t)/dt$:

$$v(t) = \frac{d}{dt} X(t) = U_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) \quad (2)$$

Если в (1) и (2) рассматривать как параметр τ , то для движения газа справедлива следующая формула [1]:

$$x(t) = X(\tau) + (t - \tau) \cdot \left[c_0 + \frac{(\gamma + 1)}{2} \cdot \frac{d}{dt} X(\tau) \right] \quad (3)$$

где c_0 – скорость звука в покоящемся газе.

Находя из (2) зависимость $\tau(v)$ и подставляя его в (1) и (3), получаем следующее выражение для распространения простой волны в газе:

$$x(t, v) = t \cdot \left[c_0 + \frac{(\gamma + 1)}{2} \cdot v \right] - \tau_p \cdot v - \tau_p \cdot \ln \left(\frac{U_p}{U_p - v} \right) \cdot \left[-U_p + c_0 + \frac{(\gamma + 1)}{2} \cdot v \right] \quad (4)$$

Для политропного газа зависимости давления и плотности газа от скорости в простой волне определяются формулами (5) и (6) соответственно:

$$P(v) = P_0 \cdot \left[1 \pm \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{v}{c_0} \right]^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}}, \quad (5)$$

$$\rho(v) = \rho_0 \cdot \left[1 \pm \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{v}{c_0} \right]^{\frac{2}{\gamma-1}}, \quad (6)$$

где P_0 и ρ_0 – давление и плотность газа в покое, знак плюс соответствует распространению волны перед поршнем, а знак минус соответствует распространению волны за поршнем.

В качестве примера приведен расчет зависимости скорости газа от расстояния $x(v,t)$, или что тоже самое $x(v,t)$, для заданной скорости поезда (поршня) $U_p = 200$ м/с (720 км/час), $\tau_p = 100$ с, $\gamma = 1,4$ и $c_0 = 340$ м/с. Значение τ_p выбрано таким образом, чтобы ускорение поезда, то есть перегрузка действующая на пассажиров, не превышала допустимой величины $2 \cdot g$, где g – ускорение силы тяжести.

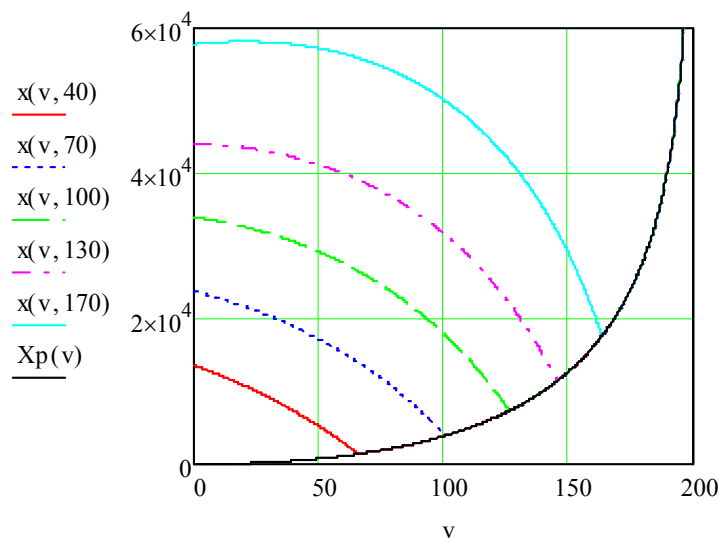


Рис. 1. Распределение скорости газа от расстояния $x(v,t)$ в моменты времени 40, 70, 100, 130 и 170 с, расстояние выражено в м, а скорость в единицах м/с.

Нижняя кривая $X_p(v)$ определяет положение поршня. Из рис. 1 следует, что выше кривых $x(v,t)$ газ покоится. Со временем волна распространяется вверх. Скорость газа, примыкающего к поршню, равна скорости поршня. Так как давление (5) и плотность газа (6) в волне выше давления и плотности в покое, то и скорость звука в волне больше скорости звука в покое. Поэтому частицы газа со временем догоняют предшествующие частицы газа, что приводит к опрокидыванию фронта волны (верхняя кривая $x(0,40)$) и возникновению слабой ударной волны. Время опрокидывания волны T_{sw} находится из уравнения $dx(v,t)/dv = 0$ в точке $v = 0$:

$$T_{sw} = \frac{2 \cdot c_0 \cdot \tau_p}{(1 + \gamma) \cdot U_p} \quad (7)$$

В рассматриваемом примере время появления слабой ударной волны $T_{sw} = 141,7$ с.

Сила тормозящая движение поезда в зависимости от скорости равна разности давлений перед поездом и за поездом (5):

$$P(v, P_0) = P_0 \cdot \left[\left[1 + \frac{(\gamma-1)}{2} \cdot \frac{v}{c_0} \right]^{\frac{2}{\gamma-1}} - \left[1 - \frac{(\gamma-1)}{2} \cdot \frac{v}{c_0} \right]^{\frac{2}{\gamma-1}} \right] \quad (8)$$

В настоящее время при оценках силы сопротивления воздуха при движении тел с различной геометрией применяется формула Ньютона, которая пропорциональна давлению P_0 :

$$P_n(v, P_0) = K \cdot \frac{P_0}{\rho_{air}} \cdot v^2 \quad (9)$$

где $K = 2$ – коэффициент формы тела (максимально возможный для плоской пластины, расположенной перпендикулярно потоку воздуха), $\rho_{air} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ плотность воздуха при давлении $P_{o1} = 10^5 \text{ Па}$.

Поскольку эти функции пропорциональны P_o , то для сравнения величин давления достаточно рассмотреть функции $\eta P(v) = P(v, P_o)/P_o$ и $\eta P_n(v) = P_n(v, P_o)/P_o$. На рис. 2 представлены зависимости $\eta P(v)$ и $\eta P_n(v)$ справедливых для любых значений давления покоящегося газа.

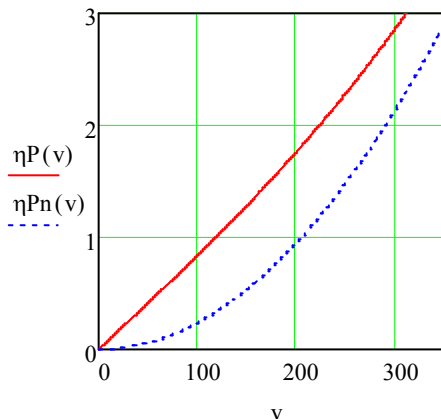


Рис. 2. Зависимости давления на поршень $P(v, P_o)$ и $P_n(v, P_o)$.

Вычисленное давление воздуха на поршень превышает давление воздуха на поршень найденной по формуле Ньютона.

Мощность $W(v, P_o)$ необходимая для преодоления поездом аэродинамического сопротивления равна произведению давления воздуха на скорость поезда:

$$W(v, P_o) = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot P_o \cdot \eta P(v) \cdot v, \tag{10}$$

а для мощности $W_n(v, P_o)$ при использовании формулы Ньютона справедливо следующее выражение:

$$W_n(v, P_o) = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot P_o \cdot \eta P_n(v) \cdot v, \tag{11}$$

где D – диаметр вакуумной трубы.

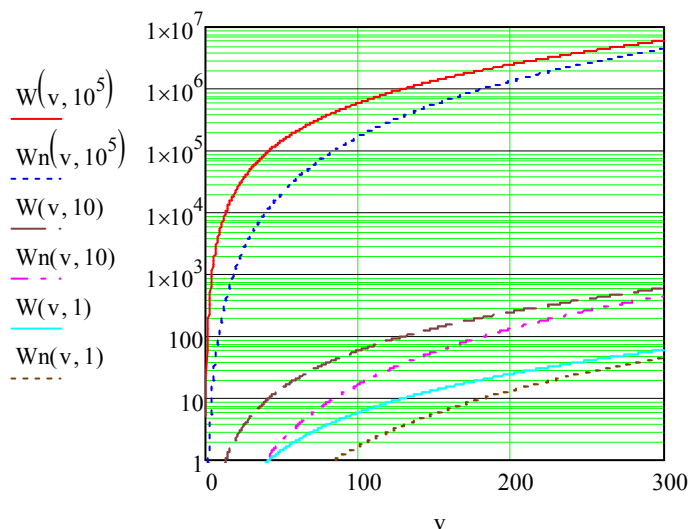


Рис. 3. Зависимости $W(v, P_o)$ и $W_n(v, P_o)$ в Вт от скорости v в м/с при давлении покоящегося воздуха в трубе 10^5 , 10 и 1 Па для трубы диаметром $D = 3 \text{ м}$.

На рис. 3 представлены зависимости мощности $W(v, P_o)$ и $W_n(v, P_o)$ от скорости и давления воздуха в трубе диаметром 3 м .

Вычисленная мощность $W(v, P_o)$ превышает мощность $W_n(v, P_o)$ найденную с использованием формулы Ньютона.

Для заданной скорости поезда 300 м/с (1000 км/час) мощность необходимая для преодоления поездом аэродинамического сопротивления равна 80 Вт при давлении 1 Па, 800 Вт при давлении 10 Па и $8 \cdot 10^6$ Вт при давлении 10^5 Па. Последняя величина сравнима с мощностью двигателей реактивного пассажирского авиалайнера.

Найденные формулы справедливы на временном промежутке от нуля до момента образования слабой ударной волны $(7)T_{sw} = 141,7$ с при ускорении поезда меньше $2 \cdot g$.

В дальнейшем будут проведены вычисления мощности поезда необходимой для преодоления аэродинамического сопротивления воздуха в зависимости от скорости поезда после образования и распада слабой ударной волны.

Литература

1. Ландау Л.Д, Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: том VI, Гидродинамика, 5-е издание, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001, Гл. X, стр. 530.

Международные транспортные коридоры как основа для грузовой версии вакуумно-левитационной транспортной системы

*Р.О. Кондратенко, *С.В. Семенов, С.Б. Нестеров, А.И. Холопкин, **Е.Н. Капустин
Москва, РНТВО им. академика С.А. Векшинского
* Балашиха, ООО "Криомаш-БЗКМ", Проспект Ленина, владение 65, стр.1
*** Казань, АО «Вакууммаш», ул. Тульская, 58*

В статье приводится обоснование начальных технико-технологических требований к грузовой версии вакуумно-левитационной транспортной системы (ГВЛТС) на основе рассмотрения габаритных размеров грузовой капсулы и вакуумного трубопровода, скорости грузовой капсулы, характеристик вакуумной среды и энергетических затрат на ее создание. Приводится строительная ячейка магистрали ГВЛТС и способы организации. Приводится пример функционирования ГВЛТС с одним вакуумным трубопроводом.

International transportation corridors as the basis of the cargo version of the vacuum levitation transportation system. R.O. Kondratenko, S.V. Semyonov, S.B. Nesterov; A.I. Holopkin, E.N. Kapustin. The basic technological requirements for the cargo version of the vacuum levitation transportation system (VLTS) are viewed. These requirements are based on overall dimensions of the cargo capsule and vacuum tube, on the cargo capsule rate, on the features of the vacuum environment and energy costs. An example of this system operating with a single vacuum tube is given.

В истории перевозок грузов можно выделить несколько революционных этапов развития:

- изобретение человеком лыж и колеса (процесс перевозки стал намного проще);
- человек приручил животных (процесс перевозки перестал изнурять организм человека);
- изобретение различных транспортных средств (время процесса перевозки уменьшилось в несколько раз, перевозка любого количества на любые расстояния);
- появление логистики, составление сборных маршрутов (оптимизация затрат на перевозку).

Исходя из этого, можно сделать вывод – новый вид перевозки грузов должен быть малообслуживаемым, энергоэффективным, быстрым, а также иметь высокую **провозную способность** (способность какого-либо вида транспорта перевезти определенное количество грузов по одной полосе движения в единицу времени) и высокую пропускную способность (максимальное количество грузовых капсул, которые может пропустить данная линия (участок) за единицу времени при определенной технической оснащенности).

Предлагаемая вакуумно-левитационная транспортная система для перевозки грузов является разновидностью наземного рельсового транспорта. Основным отличием от железнодоро-