

Численное интегрирование дифференциального уравнения движения поезда

Для определения скорости и времени хода поезда по участку интегрируют ДУ движения поезда, что позволяет определить закон движения поезда по участку.

ДУ движения поезда

$$\frac{dV}{dt} = 120 \cdot f(V), \quad (1)$$

где $\frac{dV}{dt}$ – ускорение поезда, км/ч²,

f – удельная ускоряющая сила, Н/кН.

Зададимся интервалом скорости ΔV , км/ч, получим

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = 120 \cdot f(V_{\text{cp}}), \quad (2)$$

где V_{cp} – средняя скорость в интервале ΔV .

Причем $\Delta V = V_2 - V_1$, а $V_{\text{cp}} = \frac{V_1 + V_2}{2}$.

За время Δt , ч, поезд пройдет путь $\Delta S = V_{\text{cp}} \cdot \Delta t$, км, т.е. $\Delta t = \frac{\Delta S}{V_{\text{cp}}}$.

$$\frac{V_{\text{cp}} \cdot \Delta V}{\Delta S} = 120 \cdot f(V_{\text{cp}}), \quad (3)$$

$$\Delta S = \frac{V_{\text{cp}} \cdot \Delta V}{120 \cdot f(V_{\text{cp}})}, \quad (4)$$

или

$$\Delta S = \frac{(V_2^2 - V_1^2) \cdot 10^3}{2 \cdot 120 \cdot f(V_{\text{cp}})} = \frac{4,14 \cdot (V_2^2 - V_1^2)}{f(V_{\text{cp}})}. \quad (5)$$

Время хода поезда, мин, при изменении скорости от V_1 до V_2 можно определить по средней скорости на участке пути ΔS , м

$$\Delta t = \frac{0,06 \cdot \Delta S}{V_{\text{cp}}}. \quad (6)$$

Если отрезок интегрирования на кривой $V(S)$ ограничивается не концом скоростного интервала, а переходом к элементу профиля (где другая равнодействующая сила, зависящая от уклона пути) и известно расстояние до другого элемента, но не известна скорость в конце отрезка, то формулу (5) преобразуют относительно V_2

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 + \frac{\Delta S \cdot f(V_1)}{4,17}}. \quad (7)$$

Сила сцепления колес с рельсами. Основной закон локомотивной тяги

Сила сцепления имеет природу силы трения и, если бы колесо и рельс были абсолютно твердыми телами и точки их касания – неподвижными друг относительно друга, ее можно было бы считать силой трения покоя.

Но так как материал обода колеса и рельса обладает упругостью, то их контакт не является точечным, а распространяется на некоторую поверхность, называемую контактным пятном.

В этих условиях одновременно с качением колеса происходит проскальзывание поверхности его обода по рельсу и физический процесс в контактном пятне представляется более сложным, чем трение покоя и трение скольжения, чем и объясняется необходимость специальных терминов «сила сцепления» и «коэффициент сцепления».

Коэффициент сцепления меньше коэффициента трения покоя, но больше коэффициента трения скольжения.

Следствием проскальзывания колес в процессе реализации силы тяги является то, что путь, пройденный за один оборот колеса, меньше длины его окружности.

Сила сцепления колеса с рельсом имеет предельное значение, определяемое законом Амонтона

$$F_{\text{сц max}} = 1000 \psi \cdot П, \quad (1)$$

где ψ – коэффициент сцепления,

$П$ – нагрузка от колеса на рельс, кН,

$F_{\text{сц max}}$ – предельное значение силы сцепления, Н.

При невыполнении этого закона произойдет срыв сцепления и движущие колеса начнут скользить относительно пути в точке касания – начнется боксование. Восстановить сцепление колес с рельсами можно, уменьшив силу тяги или увеличив силу сцепления, например, путем подсыпки песка.

Если считать значение коэффициентов сцепления для всех колес локомотива одинаковым, то для локомотива в целом основной закон локомотивной тяги можно выразить формулой

$$F_k \leq F_{\text{сц max}} = 1000 \psi \cdot P, \quad (2)$$

где $P = \sum П$ – сцепной вес локомотива, сумма нагрузок на рельсы от всех его движущих колес, кН,

F_k – сила тяги локомотива, Н.

Образование тормозной силы при колодочном торможении. Условие безюзового торможения

При нажатии тормозной колодки на колесо колесной пары подвижного состава между ними возникает сила трения $\varphi_k \cdot K$, где φ_k – коэффициент трения колодки о колесо.

При двухстороннем нажатии колодок на колесо имеется пара сил, которую можно заменить моментом M_T . При одностороннем нажатии колодок на колесо сила $\varphi_k \cdot K$ вызывает равную по величине и противоположно направленную реакцию колеса $\varphi_k \cdot K'$. Из-за жесткой связи колодки с рамой тележки реакция колеса передается на узел крепления колеса в раме тележки – буксу.

Пара сил ($\varphi_k \cdot K$, $\varphi_k \cdot K'$) с плечом R_k создает тормозной момент M_T , направленный против вращения колеса. Тормозной момент M_T можно представить в виде пары сил (B_1 , B_1) с плечом R_k ,

$$M_T = B_1 \cdot R_k \quad (1)$$

$$B_1 = \varphi_k \cdot K, \quad (2)$$

приложенных в точках, которые могут быть точками приложения внешних сил. Это точка касания обода колеса с рельсом O и точка A , находящаяся на оси вращения колеса.

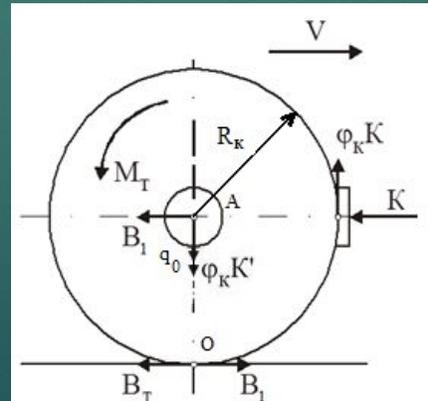


Рисунок – Схема сил при движении в режиме колодочного торможения

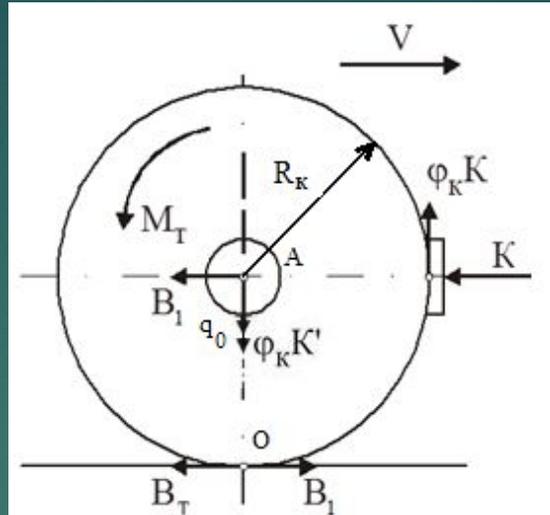


Рисунок – Схема сил при движении в режиме колодочного торможения

Под действием силы B_1 , приложенной к рельсу в точке контакта колеса и рельса, возникает горизонтальная сила реакции рельса на колесо B_T . Если эти силы уравновешены, т.е. равны между собой $B_1 = B_T$, что свидетельствует об отсутствии проскальзывания колеса относительно рельса, то точка O явится для колеса мгновенным центром вращения.

Вторая сила B_1 из пары приложена в точке A к центру вращения колеса, передается на кузов и вызывает замедление поезда. Эта вторая сила B_1 является внешней для той части транспортного средства, которая движется поступательно (т.е. за исключением колесных пар). А тормозной силой поезда следует считать сумму сил B_T реакций пути на все движущие колесные пары, которая является внешней ко всему локомотиву.

Для нормальной реализации тормозной силы необходимо, чтобы она не превышала предельную силу сцепления.

Это условие является **условием безюзового торможения**.

При его невыполнении произойдет заклинивание колес и их скольжение относительно пути – юз. При юзе уменьшается тормозная сила, поскольку коэффициент скольжения всегда меньше коэффициента сцепления, соответствующего нормальному торможению. Кроме того, при юзе увеличиваются время торможения и тормозной путь.

Если считать значение коэффициентов трения об обод колеса для всех колодок в поезде одинаковым и коэффициентов сцепления для всех тормозных колес одинаковым, то для поезда в целом условие безюзового торможения можно выразить формулой

$$B_T = \varphi \cdot \sum K \leq F_{\text{сц max}} = \psi \cdot \sum q_0, \quad (1)$$

где $\sum K$ – сумма сил нажатия всех колодок в поезде, кН,

$\sum q_0$ – сумма нагрузок на рельсы от всех его тормозных колес, кН,

B_T – тормозная сила поезда, кН.

Сопротивление движению поезда

В процессе движения на поезд действуют многочисленные внешние неуправляемые силы, влияющие на движение. Эквивалентная сила, направленная, как правило, против движения (за исключением движения по крутому спуску), приложенная в точках касания колес с рельсами, на преодоление которой затрачивается такая же работа, как на преодоление всех внешних неуправляемых сил, влияющих на движение поезда, называется силой сопротивления движению W . (Силы сопротивления подвижного состава принято обозначать буквой W .)

Общее сопротивление движению подвижного состава W представляет собой сумму основного W_0 , дополнительного $W_{\text{доп}}$ и добавочного $W_{\text{доб}}$ сопротивлений:

$$W = W_0 + W_{\text{доп}} + W_{\text{доб}}, \quad (1)$$

где W_0 – основное сопротивление, под которым понимается эквивалентная сила, направленная против движения, приложенная в точках касания колес с рельсами, на преодоление которой затрачивается такая же работа, как на преодоление всех внешних неуправляемых сил препятствующих движению по прямому горизонтальному пути при нормальных погодных условиях (скорость ветра < 6 м/с, температура наружного воздуха > -30 °С):

1) Сопротивления пути:

1.1 от трения качения колеса по рельсу (от составляющей нормальной реакции рельса против движения и деформации рабочих поверхностей);

1.2 от трения скольжения колеса по рельсу (от крива и взаимодействия гребня с рельсом).

2) Воздушной среды (от сжатия воздуха перед поездом и разряжения между вагонами).

3) Подвижного состава (от трения в подшипниках).

Величина основного сопротивления W_0 зависит от квадрата скорости V .

Таблица – Формулы для расчета основного удельного сопротивления

Для локомотивов в режиме тяги w_0'	$w_0' = a + b \cdot V + c \cdot V^2$
Для локомотивов в режиме холостого хода (выбег или механическое торможение) w_x'	$w_x' = a + b \cdot V + c \cdot V^2$
Для вагонов w_0''	$w_0'' = a + \frac{b + c \cdot V + d \cdot V^2}{q_0}$
Для поезда в режиме тяги w_0	$w_0 = \frac{w_0' P + w_0'' Q}{P + Q}$, где P – вес локомотива, кН; Q – вес вагонов, кН.
Для поезда при работе локомотива в режиме холостого хода w_{0x}	$w_{0x} = \frac{w_x' P + w_0'' Q}{P + Q}$

$W_{\text{доп}}$ – дополнительное сопротивление, под которым понимаются временно действующие силы при движении по уклону профиля пути (составляющая веса поезда, направленная на подъеме – по, а на спуске - против движения поезда) и в кривой (от трения гребня о рельс под действием центробежной силы, проскальзывания колес из-за превышения радиуса внешнего рельса над внутренним, трения в опорах кузова),

$W_{\text{доб}}$ – добавочное сопротивление, которое возникает при трогании с места (из-за большей деформации колеса и рельса и полусухого трения при выдавленной смазки из-под трущихся поверхностей), при низких температурах окружающего воздуха (из-за возрастания вязкости смазки и коэффициента трения), при сильном ветре и движении в туннелях.