

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТОРМОЖЕНИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫМ БАРЬЕРОМ ОБОРВАВШЕГОСЯ СОСТАВА

Бирюков В.В., магистрант; Гутаревич В.О., доц., к.т.н.

(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина)

При проектировании и разработке аварийных средств улавливания оборвавшегося состава вагонеток возникает необходимость определения продольных динамических нагрузок взаимодействия вагонеток с предохранительным барьером для обоснования и выбора рациональных параметров средств аварийной защиты.

Задаёмся следующими допущениями для построения математической модели, описывающей движение и торможение предохранительным барьером оборвавшегося состава. Состав состоит из однотипных вагонеток, сопротивления движению вагонеток равны, расстояния между буферами вагонеток в растянутом поезде равны, удар вагонеток рассматривается как прямой и центральный, продольные агрегатные жёсткости вагонеток, а также жёсткости сцепок равны, сила торможения приложена к массе первой вагонетки и действует по линии движения поезда, проходящей через центры масс. Состав вагонеток рассматривается в виде системы твердых тел, соединенных упругими связями. При определении динамических нагрузок в сцепных устройствах головную массу состава можно рассматривать как абсолютно жёсткую массу.

На основании принципа Даламбера дифференциальные уравнения движения состава записываются в виде:

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_1 &= \pm F_T - S_1 - F_1; \\
 m_1 \ddot{x}_1 &= S_1 - S_2 - F_2; \\
 m_i \ddot{x}_i &= S_i - S_{i+1} - F_i; \\
 &\dots\dots\dots \\
 m_n \ddot{x}_n &= S_n - F_n;
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь F_T – сила тяги (+) или торможения (–), приложенная к массе первой вагонетки в составе m_0 , кН; m_i – масса вагонетки поезда, т; x_i – координата центра масс i -й вагонетки; S_i – усилие в i -й межвагонеточной связи; F_i – сила сопротивления i -й вагонетки поезда; n – количество вагонеток в составе поезда.

При исследовании состав вагонеток рассматривается как система твёрдых тел m_i соединенных упругими связями, а предохранительный барьер – как амортизатор с демпфером, укрепленный на жесткой опоре (вязкоупругий буфер, модель Кельвина-Фохта). Движение вагонеток при торможении описывается уравнением (1) со следующими начальными условиями: $x_i = 0$; $\dot{x}_i = v$; $i = 0, 1, 2, \dots, n$ (при $t = 0$). А динамическая нагрузка и сила торможения предохранительным барьером находится по формуле:

$$F = cx + \alpha \dot{x} \quad (2)$$

где c – жесткость предохранительного барьера, Н/м;

α – коэффициент вязкого сопротивления, Н·с/м.

На вагонетку, расположенную на наклонном рельсовом пути действуют сила вредных сопротивлений: $G_B \cdot w' \cos \beta$ и продольная составляющая собственного веса, равная $G_B \cdot w' \sin \beta$. Тогда сила сопротивления движению вагонеток в составе поезда в случае их самокатного движения под уклон определяется следующим выражением:

$$F_i = G_{Bi}(w'_i \cdot \cos \beta - \sin \beta) \quad (3)$$

где G_B – полный вес вагонетки, кН; w' – сопротивление движению вагонетки.

Реакция упругой связи между первой и второй вагонетками в случае торможения состава выглядит следующим образом:

$$S_1 = C \varepsilon_1$$

где C – жесткость межвагонеточной связи, МН/м,

ε_1 – удлинение упругой связи между центрами масс первой и второй вагонеток.

Торможение поезда осуществляется в условиях предварительно растянутого состава вагонеток. Учитывая что в данном случае между центрами масс единиц подвижного состава идет процесс сжатия, запишем уравнение для связи первой и второй вагонеток:

$$\frac{d^2 \varepsilon_1}{dt^2} = \frac{d^2 x_2}{dt^2} - \frac{d^2 x_1}{dt^2}$$

Преобразовывая это выражение и учитывая принятые допущения, динамические нагрузки в буферах и рамах соударяющихся вагонеток при торможении состава в итоге определяются из зависимости:

$$S_{i\tau} = \frac{F_i}{(b+i)} + \sqrt{\left[\frac{F_i}{b+i}\right]^2 + \frac{HC[(F_i + G_B w) - G_B w b]}{(b+i)(b+i-1)} \left(\sum_{n=1}^i \sqrt{\frac{b}{n} + 1}\right)^2} \quad (4)$$

где b – отношение массы вагонетки к массе состава:

$$b = \frac{m_1}{\sum_{n=1}^{i+1} m_n}$$

F_i – тормозная сила.

Так как при движении вагонетки с ускорением (а в нашем случае замедлением) добавочные сопротивления движению обусловлены ещё и силами инерции:

$$W = \pm G_B \cdot w'_a = \pm \frac{G_s \cdot (1 + k_o)}{g}, \text{ Н} \quad (5)$$

где k_o – коэффициент который учитывает инерцию вращающихся частей вагонетки ($k_o=0.075$ для вагонеток типа ВГ 3,3).

Движение оборвавшегося состава можно условно поделить на два этапа.

Первый этап протекает с момента обрыва и до момент взаимодействия с предохранительным барьером. Тогда уравнение движения первой вагонетки примет вид:

$$M_{\text{пр}} \cdot \ddot{x} = G_B (\sin\beta - w' \cdot \dot{x} \cdot \cos\beta)$$

Второй — начиная с момента контакта вагонетки и улавливающего барьера и до полной остановки. В этом случае возникают дополнительные продольные динамические нагрузки обусловленные торможением состава вагонеток улавливающим барьером. Для их учёта в математической модель вводим влияние межвагонеточных связей (4). Тогда уравнение движения первой вагонетки принимает следующий вид:

$$M_{\text{пр}} \cdot \ddot{x} = G_B (\sin\beta - w' \cdot \dot{x} \cdot \cos\beta) - (c \cdot x + \alpha \cdot \dot{x}) + \left(\frac{F_1}{(b+1)} + \sqrt{\left[\frac{F_1}{b+1} \right]^2 + \frac{Hc[(F_1 + G_B w) - G_B w b]}{(b+1)b}} (b+1) \right)$$

В итоге на основании проведенных исследований получена математическая модель, описывающая движение состава вагонеток при самокатном аварийном спуске под уклон. Установленная взаимосвязь между параметрами дала возможность получить оптимальные значения показателей предохранительного барьера. Оптимизация проводилась при помощи ортогонального плана второго порядка с четырьмя факторами (скорость, количество вагонеток, жёсткость и вязкость предохранительного барьера), которые варьировались на пяти уровнях. В результате было получено уравнение регрессии, и после его исследования на экстремум, пришли к выводу, что для состава из 3-х вагонеток типа ВГ 3,3 при максимальной скорости подхода к барьеру 7 м/с, угле наклона выработки 20°, оптимальными показателями улавливающего барьера являются: вязкость барьера — 0,5 МН•с/м, жёсткость — 25 МН/м.