

УДК 656.212.6.073.22.002.5

С. М. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, А. Д. ЖЕЛЕЗНЯКОВ, кандидат технических наук, Л. П. ЦЕЛКО-ВИКОВА научный сотрудник, Белорусский государственный университет транспорта г. Гомель

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СОУДАРЕНИЙ ВАГОНОВ ПРИ СУХОМ ТРЕНИИ В ОПОРАХ ГРУЗА

Предлагаются результаты теоретических исследований перемещений длинномерного груза, перевозимого на сцепе двух железнодорожных платформ, оборудованных турникетно-крепежными устройствами (ТКУ), а также сил, действующих на груз со стороны ТКУ.

Исследования выполнены методом теории колебаний механических систем с конечным числом степеней свободы. Платформы сцепа и груза считаются абсолютно жесткими телами, а межвагонные соединения и опоры ТКУ – упругими связями постоянной жесткости сухим трением. Для получения движения системы используем принцип Даламбера.

Расчетная схема соударения сцепа с неподвижной преградой (группы заторможенных вагонов) показана на рисунке 1.

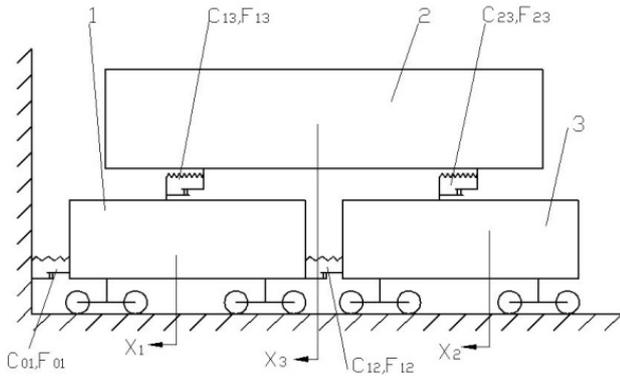


Рисунок 1 – Расчетная схема соударения вагона

В начальный момент набегания сцепа на преграду платформа 1 получает жесткий удар, сила которого при любой скорости соударения  $v_0$  к началу деформации упругой связи  $C_{01}$  практически мгновенно возрастает до величины силы трения  $F_{01}$ . В результате платформа 1 как жесткое тело приобретает ускорение  $x_1$ , зависящие от степени участия в ударе каждой из масс системы. Возможны следующие варианты взаимодействия тел:

Все три массы системы жестко соединены между собой силами сухого трения в единое тело и на первом этапе движутся совместно ( $x_1 = x_2 = x_3$ ). Условия, при которых возникает такое движение, могут быть представлены в виде

$$\frac{F_{12} + F_{13}}{m_2 + m_3} \geq \frac{F_{01}}{m_1 + m_2 + m_3} \leq \frac{F_{13} + F_{23}}{m_3}. \quad (1)$$

Рассматриваемое движение описывается уравнением

$$(m_1 + m_2 + m_3) \ddot{x}_1 + c_{01}x_1 = -F_{01} \operatorname{sign} \dot{x}_1. \quad (2)$$

Характер движения сохраняется, пока выполняется следующие условие  $x_1 \geq 0$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{c_{01}x_1 + F_{01}}{m_1 + m_2 + m_3} &\leq \frac{F_{12} + E_{13}}{m_2 + m_3}; \\ \frac{c_{01}x_1 + F_{01}}{m_1 + m_2 + m_3} &\leq \frac{F_{12} + E_{23}}{m_2}; \\ \frac{c_{01}x_1 + F_{01}}{m_1 + m_2 + m_3} &\leq \frac{F_{13} + E_{23}}{m_3}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

При нарушении первого, второго или третьего неравенства (3) начинает двигаться отдельно первая, вторая или третья массы системы соответственно.

Платформы 1 и 2 жестко соединены между собой силами сухого трения в единое тело и на первом этапе движутся совместно ( $x_1 = x_2$ ), а груз 3 начинает проскальзывать относительно их. Условия возникновения такого движения в момент удара определяются неравенствами

$$\frac{F_{12} - F_{23}}{m_2} \geq \frac{F_{01} - F_{13} - F_{23}}{m_1 + m_2} > \frac{F_{13} F_{23}}{m_3} \quad (4)$$

и описываются следующими уравнениями:

$$m_3 \ddot{x}_3 + (c_{13} + c_{23})(x_3 - x_1) = -(F_{13} + F_{23}) \operatorname{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_1), \quad (5)$$

где  $\operatorname{sign}(\dot{x} - \dot{x}') = +1$  при  $(\dot{x} - \dot{x}') > 0$ ,  
 $\operatorname{sign}(\dot{x} - \dot{x}') = -1$  при  $(\dot{x} - \dot{x}') < 0$ .

Рассматриваемый вид движения происходит до тех пор, пока соблюдаются условия  $x_1 \geq 0$ ;  $(x_3 - x_1) \geq 0$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{F_{01} - F_{13} - F_{23} + c_{01}x_1 - (c_{13} + c_{23})(x_3 - x_1)}{m_1 + m_2} &\leq \frac{F_{12} - F_{23} - c_{23}(x_3 - x_1)}{m_2}; \\ \frac{F_{01} - F_{13} - F_{23} + c_{01}x_1 - (c_{13} + c_{23})(x_3 - x_1)}{m_1 + m_2} &> \frac{F_{13} + F_{23} + (c_{13} + c_{23})(x_3 - x_1)}{m_3}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

При нарушении первого неравенства в полученных условиях возникает относительное перемещение платформ 1 и 2, при нарушении второго – все три массы начинают двигаться совместно.

Массы 1 и 3 жестко связаны между собой силами сухого трения в единое тело и на первом этапе движутся совместно ( $x_1 = x_3$ ), а платформа 2 начинает проскальзывать относительно них. Условия, при которых возникает такое движение, могут быть получены в виде

$$\frac{F_{13} - F_{23}}{m_3} \geq \frac{F_{01} - F_{12} - F_{23}}{m_1 + m_3} > \frac{F_{12} + F_{23}}{m_2}. \quad (7)$$

Рассматриваемое движение описывается уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} (m_1 + m_3)\ddot{x}_1 + c_{01}x_1 - (c_{12} + c_{23})(x_2 - x_1) = \\ = -F_{01}\text{sign}\dot{x}_1 + (F_{12} + F_{23})\text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1); \\ m_2\ddot{x}_2 + (c_{12} + c_{23})(x_2 - x_1) = -(F_{12} + F_{23})\text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Этот вид движения происходит только при соблюдении следующих условий (при  $x_1 \geq 0$ ;  $(x_2 - x_1) \geq 0$ ):

$$\left. \begin{aligned} \frac{F_{01} - F_{12} - F_{23} + c_{01}x_1 - (c_{12} + c_{23})(x_2 - x_1)}{m_1 + m_3} \leq \frac{F_{13} - F_{23} - c_{23}(x_2 - x_1)}{m_3}; \\ \frac{F_{01} - F_{12} - F_{23} + c_{01}x_1 - (c_{12} + c_{23})(x_2 - x_1)}{m_1 + m_3} > \\ > \frac{F_{12} + F_{23} + (c_{12} + c_{23})(x_2 - x_1)}{m_2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В случае нарушения первого неравенства в условиях (9) возникает относительное перемещение масс 1 и 3, при нарушении второго – все три массы начинают двигаться совместно.

Массы 2 и 3 жёстко связаны между собой силами сухого трения в единое тело и на первом этапе движутся совместно ( $x_2 = x_3$ ), а платформа 1 начинает проскальзывать относительно их. Условия, при которых возникает рассматриваемое движение, можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} (m_2 + m_3)F_{23} > |m_3F_{12} - m_2F_{13}|; \\ \frac{F_{01} - F_{12} - F_{23}}{m_1} > \frac{F_{12} + F_{13}}{m_2 + m_3}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Оно описывается следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} m_1\dot{x}_1 + c_{01}x_1 - (c_{12} + c_{13})(x_3 - x_1) = \\ = -F_{01}\text{sign}\dot{x}_1 + (F_{12} + F_{13})\text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_1); \\ (m_2 + m_3)\ddot{x}_3 + (c_{12} + c_{13})(x_3 - x_1) = \\ = -(F_{12} + F_{13})\text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_1). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Характер движения сохраняется до тех пор, пока выполняются условия (при  $x \geq 0$ ,  $(x - x) \geq 0$ ):

$$\left. \begin{aligned} F_{23} \geq \frac{m_3[c_{12}(x_3 - x_1) + F_{12}] - m_2[c_{13}(x_3 - x_1) + F_{13}]}{m_2 + m_3}; \\ (m_1 + m_2 + m_3)(F_{12} + F_{13}) - (m_2 + m_3)F_{01} > \\ > (m_1 + m_2 + m_3)(c_{12} + c_{13})(x_3 - x_1) - (m_2 + m_3)c_{01}x_1. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

В случае нарушения первого неравенства в условиях (12) возникает относительное перемещение масс 2 и 3, при нарушении второго – все три массы начинают двигаться совместно.

Все три массы системы имеют перемещения относительно друг друга. Такое движение возникает в случаях, когда не выполняется ни одно из условий (1), (4), (7), (10) в начале движения или нарушаются первые неравенства в условиях (6), (9), (12). Дифференциальные уравнения этого вида движения имеют вид (13). Рассматриваемый характер движения сохраняется до возникновения условий для жёсткого соединения каких-либо масс силами трения.

$$\left. \begin{aligned} m_1\ddot{x}_1 + c_{01}x_1 - c_{12}(x_2 - x_1) - c_{13}(x_3 - x_1) = \\ = -F_{01}\text{sign}\dot{x}_1 + F_{12}\text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + F_{13}\text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_1); \\ m_2\ddot{x}_2 + c_{12}(x_2 - x_1) - c_{23}(x_3 - x_2) = \\ = -F_{12}\text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + F_{23}\text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2); \\ m_3\ddot{x}_3 + c_{13}(x_3 - x_1) + c_{23}(x_3 - x_2) = \\ = -F_{13}\text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) - F_{23}\text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Порядок расчётов по приведенным уравнениям может быть принят следующим:

а) по формулам (1), (4), (7), (10) определяется характер движения на его начальном этапе;

б) по выявленному характеру движения производится интегрирование соответствующих уравнений при начальных условиях:  $t = 0$ ,  $x_1(0) = x_2(0) = x_3(0) = 0$ ,  $\dot{x}_1(0) = \dot{x}_2(0) = \dot{x}_3(0) = v_0$ . Интегрирование ведётся до тех пор, пока соблюдаются условия, соответствующие этому характеру движения;

в) при нарушении характера движения используется другая, соответствующая этому нарушению, система уравнений и производится её интегрирование при начальных условиях, равных значениям параметров в конечный момент предыдущего этапа. Интегрирование производится, пока не нарушатся условия, определяющие характер движения на рассматриваемом этапе;

г) работы по п. «в» продолжаются до прекращения роста значений  $x_1$ ;  $(x_3 - x_1)$ ;  $(x_2 - x_1)$ ;

д) проверяется соответствие максимальных величин полученных относительных перемещений  $x_1$ ;  $(x_3 - x_1)$ ;  $(x_3 - x_2)$ ;  $(x_2 - x_1)$  заданным конструктивным ограничениям (указанные перемещения не должны превышать допускаемых значений). Если это условие не выполняется, то либо рассматриваемый расчётный вариант, определяемый сочетанием параметров системы и скорости соударения, признается неприемлемым (не удовлетворяющим ограничениям), либо решается вопрос об учёте собственной упругости масс сцепа;

е) в случае удовлетворения полученных относительных перемещений установленным ограничениям максимальные значения усилий, характеризующих повреждаемость груза, определяются из формул

$$\left. \begin{aligned} N_{13m} = \max[c_{13}(x_3 - x_1) + F_{13}]; \\ N_{23m} = \max[c_{23}(x_3 - x_2) + F_{23}]. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

По изложенной методике были проведены расчеты по определению динамических воздействий на перевозимый длинномерный груз при соударении сцепа с неподвижной преградой. Для расчета было принято:  $m_1 = m_2 = 2,2 \cdot 10^4$  кг (что соответствует массе порожней четырехосной платформы);  $m_3 = 12,02 \cdot 10^4$  кг (соответствует примерно полному использованию грузоподъемности двух платформ);  $c_{01} = c_{12} = 8,5$  МН/м (соответствует жёсткости двух последовательно работающих поглощающих аппаратов автосцепки);  $F_{01} = F_{12} = 0,2$  МН (соответствует предварительной затяжке поглощаемого аппарата);  $v_0 = 2$  м/с (примерно соответствует перспективной норме скорости соударения).

Допускаемые значения относительных перемещений (зазоры в связях) принимались равными:  $[x_1] = [x_2 - x_1] = 0,15$  м (примерно соответствует удвоенному ходу поглощающего аппарата с учетом зазоров и деформаций жёстких тел);  $[x_3 - x_1] = [x_3 - x_2] = 0,5$  м.

Расчёт с использованием программы интегрирования дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты четвёртого порядка. Рассматривались четыре комбинации коэффициентов трения:  $\mu_{13} = \mu_{23} = 0,1$ ;  $\mu_{13} = \mu_{23} = 0,3$ ;  $\mu_{13} = \mu_{23} = 0,5$ ;  $\mu_{12} = 0,1$ ;  $\mu_{23} = 0,55$ .

Проверка выполнения условий (1), (4), (7), (10) показала, что движение сцепа в начальный момент соударения при всех сочетаниях коэффициентов трения между грузом и платформами, кроме первого (при  $\mu_{13} = \mu_{23} = 0,1$ ), начинается с совместного движения всех трёх масс. При первом сочетании указанных коэффициентов платформы 1 и 2 начинают двигаться совместно, а груз относительно их проскальзывает. Результаты расчёта по определению относительных перемещений элементов системы и усилий  $N_{13}$  и  $N_{23}$  с учётом ограничений по зазорам в ТКУ и поглощающих аппаратах представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчётов

Варьируемые параметры, МН				Относительные перемещения, м			$N_{13}$ , МН	$N_{23}$ , МН
$c_{13}$	$c_{23}$	$F_{12}$	$F_{23}$	$x_1$	$x_3 - x_1$	$x_3 - x_2$		
0	0,5	0,06	0,06	–	>>0,500*	>>0,500*	–	–
		0,18	0,18	0,129	0,509*	0,509*	0,18	0,4194
		0,30	0,30	0,144	0,380	0,380	0,30	0,4634
		0,06	0,33	0,118	0,508*	0,508*	0,05	0,5615
	4	0,06	0,06	0,117	0,378	0,268	0,06	1,1320
		0,18	0,18	0,130	0,306	0,211	0,18	1,0235
		0,30	0,30	0,144	0,255	0,161	0,30	1,0446
		0,06	0,33	0,118	0,320	0,206	0,0	1,15
0,5	0,5	0,06	0,06	–	>>0,500*	>>0,500*	–	–
		0,18	0,18	0,131	0,437	0,396	0,39	0,37
		0,30	0,30	0,146	0,326	0,279	0,46	0,4396
		0,06	0,33	0,120	0,431	0,382	0,27	0,5211
4	4	0,06	0,06	>>0,150*	–	–	–	–
		0,18	0,18	>>0,150*	–	–	–	–
		0,30	0,30	>>0,15	–	–	–	–
		0,06	0,33	–	–	–	–	–
8	8	0,06	0,06	>>0,150*	–	–	–	–
		0,18	0,18	>>0,150*	–	–	–	–
		0,30	0,30	>>0,150*	–	–	–	–
		0,06	0,33	>>0,150*	–	–	–	–

\* Не удовлетворяет ограничениям по зазорам в поглощающих аппаратах или ТКУ.

Получено 10.10.2016.

**S. M. Vasilyeu, A. D. Zheleznyakov, L. P. Tselkovikova.** Modelling of collisions of the cars in the dry friction in the supports of the load.

Simulation collisions at dry friction in the bearings shipping goal. Available results of theoretical studies of long cargo movements carried on to mate two railway platforms equipped turnstile-fastening devices (TAS), as well as the forces acting on the cargo by the TAS.

Как видно из полученных данных, рациональная схема ТКУ должна обеспечивать минимальную жёсткость на первой по ходу движения платформе и жёсткость, подбираемую исходя из ограничений по зазорам в ТКУ и поглощающих аппаратах, на задней платформе. Такое сочетание должно сохраняться независимо от направления при ударе. Наименьшие силы удара, действующие на груз, возникают при средних значениях коэффициентов трения в ТКУ. Эти выводы могут быть уточнены путём оптимизации упругих и демпфирующих параметров с применением методов математического программирования.

### Список литературы

- 1 Размещение и крепление грузов в вагонах / А. Д. Малов [и др.]. – М. : Транспорт, 1980. – 328 с.
- 2 Исследование с помощью ЦВМ нагрузок, действующих на вагоны и амортизированные грузы при соударении сцепов и пуске в ход грузовых поездов / Л. А. Манашкин [и др.] // Проблемы механики наземного транспорта : тр. ДИИТа. Вып. 199/25. – Днепропетровск, 1978. – С. 87–93.
- 3 **Никольский, Л. Н.** Амортизаторы удара подвижного состава / Л. Н. Никольский, Б. Г. Кеглин. – М. : Машиностроение, 1986. – 144 с.
- 4 Совершенствование способов размещения и крепления грузов в вагонах / под ред. А. Д. Малова. – М. : Транспорт, 1970. – 136 с.
- 5 **Спиридонов, Б. К.** Аналитическое определение динамических силовых характеристик катковых опор турникетно-крепёжных устройств / Б. К. Спиридонов, А. Д. Железняков. – Гомель : БелИИЖТ, 1982. – 14 с. Деп. в ЦНИИТЭМ МПС, 1982, № 2094.
- 6 **Спиридонов, Б. К.** Применение подвижных турникетно-крепёжных устройств для перевозки длинномерных строительных конструкций железнодорожным транспортом / Б. К. Спиридонов, А. Д. Железняков, Л. П. Целковикова. – Гомель : БелИИЖТ, 1982. – 13 с. Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 1982, № 2093.
- 7 **Васильев, С. М.** Параметры подвижных турникетно-крепёжных устройств для перевозки длинномерных грузов на железнодорожном подвижном составе : дис. ... канд. техн. наук / С. М. Васильев; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель, 2011.