

УДК 656.073.22:629.4.015

*И. А. ВОРОЖУН*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

## **АНАЛИЗ КОРРЕКТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СОУДАРЕНИЯ ВАГОНОВ-ПЛАТФОРМ ПРИ УПРУГОМ СПОСОБЕ КРЕПЛЕНИЯ НА НИХ ЯРУСОВ ТРУБ**

Выполнен анализ полученных результатов по принятой математической модели процесса соударения различного количества вагонов при жестком и упругом способах крепления груза. Исследовано влияние коэффициента трения между ярусами труб и рамой платформы, а также предварительного натяжения упругих элементов крепления на величину остаточного продольного смещения труб относительно платформы при ее соударении с вагонами стенки. Корректность математической модели устанавливалась путем сопоставления результатов расчета с результатами, полученными при натурных испытаниях на соударение вагонов. Приведены рекомендации по использованию при выполнении расчетов количества вагонов стенки.

**Ключевые слова:** платформа, трубы, крепление грузов, динамические силы, соударение вагонов.

При строительстве магистральных нефтепроводов и газопроводов, а также водопроводов, тепловых сетей, канализационных сооружений применяются трубы большого диаметра. Особенность таких труб состоит в том, что они при больших габаритах обладают относительно небольшой массой, из-за чего при перевозке труб большого диаметра грузоподъемность транспортных средств используется не в полной мере. Поэтому важной задачей является разработка подходов, позволяющих обеспечить транспортировку труб при максимально возможной загрузке ими вагона. Размещение и крепление грузов на подвижном составе должно выполняться в соответствии с требованиями, изложенными в нормативных документах [1, 2], которые предусматривают размещение и крепление в полувагоне 6 труб диаметром 1020 мм, 5 труб диаметром 1220 мм, 4 труб диаметром 1420 мм. В то же время габарит погрузки позволяет разместить на железнодорожной платформе соответственно 9, 6 и 5 труб указанных диаметров. Жесткие крепления обладают большой массой и стоимостью, вследствие чего разрабатываются облегченные средства крепления груза, содержащие упругие элементы [3, 4].

В устройстве [3] с упругими элементами крепления труб вследствие отклонений формы и размеров как самих труб, так и поперечных балок с ложементами, а также неточности установки последних при укладке труб поперечные балки в местах наименьшего поперечного сечения испытывают изгибные напряжения. При многократном использовании таких устройств в

указанных местах поперечных балок возможно появление трещин и последующее разрушение, приводящее к аварийной ситуации. В связи с этим было разработано устройство [4] для крепления труб, отличающееся тем, что элементы поперечных балок в местах наименьшего поперечного сечения соединены между собой шарнирами. Шарнирное соединение элементов поперечных балок позволяет ложеаментам самоустанавливаться на поверхностях труб и устраняет возникновение знакопеременных напряжений изгиба в местах с наименьшим поперечным сечением указанных балок при погрузочно-разгрузочных работах.

Наиболее неблагоприятные воздействия платформа, трубы и элементы их крепления испытывают при соударениях вагонов во время проведения маневровых работ, особенно при роспуске с сортировочных горок. Наличие упругих креплений требует учета возможности смещения груза в вагонах при их соударениях, поэтому помимо обеспечения сохранности груза повышенное внимание следует уделять и безопасности движения. Соответственно требуется анализ взаимодействий в системе «поезд – транспортируемый груз» [5, 6].

Представленная работа посвящена установлению корректности математической модели механической системы «ярусы труб – устройство крепления – платформа – вагоны», предложенной в [7, 8] для описания упругого крепления ярусов труб к платформе. Система дифференциальных уравнений, отражающих движение  $k$  ярусов груза, платформы и  $n$  вагонов стенки составлена с применением способа Даламбера:

$$\left. \begin{aligned} m_{\Gamma_i} \ddot{x}_{\Gamma_i} + T_{\Gamma_i} - F_{\Gamma_{i-1}} &= 0; \\ m_{\Pi} \ddot{x}_{\Pi} - T_{\Pi} - F_{\Gamma_k} + R_{B_1} &= 0; \\ m_{B_j} \ddot{x}_{B_j} - R_{B_j} + R_{B_{j+1}} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $m_{\Gamma_i}$ ,  $m_{\Pi}$ ,  $m_{B_j}$  – масса соответственно яруса груза ( $i = 1, \dots, k$ ), платформы и вагона «стенки» ( $j = 1, \dots, n$ );  $\ddot{x}_{\Gamma_k}$ ,  $\ddot{x}_{\Pi}$ ,  $\ddot{x}_{B_j}$  – продольное ускорение соответственно яруса груза, платформы и вагона стенки;  $T_{\Gamma_j}$  – продольная горизонтальная проекция силы в упругих элементах крепления яруса груза к платформе;  $T_{\Pi}$  – суммарная продольная горизонтальная сила в упругих элементах крепления ярусов груза к платформе;  $F_{\Gamma_i}$  – сила сухого трения между ярусом груза и платформой;  $R_{B_j}$  – сила в междувагонных связях.

Особенностью рассматриваемой расчетной схемы является особая форма учета сил кулонова трения, максимальное значение которых достигается только при положительной разности между скоростями контактирующих элементов системы, расположенных выше и ниже соответственно, а также сил в упругих элементах крепления с линейными характеристиками.

Продольные горизонтальные силы в упругих элементах крепления  $i$ -го яруса груза определяются выражением

$$T_{\Gamma_i} = c_{\Gamma_i} \Delta L_{\Gamma_i} \cos \alpha_{\Gamma_i},$$

где  $c_{\Gamma_i}$  – коэффициент жесткости упругих элементов крепления груза, Н/м;  $\Delta L_{\Gamma_i}$  – деформация упругих элементов крепления груза, м;  $\alpha_{\Gamma_i}$  – угол наклона к горизонту элементов упругого крепления груза.

Тригонометрическая функция угла  $\alpha_{\Gamma_i}$  определяется в соответствии с размерами устройства для принятой схемы крепления груза.

Силы в междувагонных связях с пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами при перемещениях вагонов, не превышающих ход поглощающих аппаратов, определяются следующим выражением

$$R_{B_j} = c_{B_j} (x_{B_{j-1}} - x_{B_j}) (1 + \varphi \operatorname{sgn}((x_{B_{j-1}} - x_{B_j})(\dot{x}_{B_{j-1}} - \dot{x}_{B_j}))),$$

где  $c_{B_j}$  – коэффициент жесткости упругих элементов междувагонных связей, Н/м;  $\varphi$  – коэффициент относительного трения междувагонных связей.

Система уравнений (1) справедлива при наличии в устройстве поперечной обвязки и промежуточных опор между ярусами груза. В этом случае поперечную обвязку и промежуточные опоры следует рассматривать как соответствующие ярусы груза.

В ходе исследования процесса соударения одиночной груженой платформы с разным количеством вагонов стенки оценивалось влияние жесткости упругих элементов продольного крепления груза и коэффициента трения между соприкасающимися поверхностями груза и платформы на величину сил в междувагонных связях и замедление платформы. В таблице 1 представлены результаты расчетов соударения одиночной груженой платформы ( $m_{\Gamma_i} = 27300$  кг,  $m_{\Pi} = 21000$  кг) с разным количеством вагонов ( $m_{B_j} = 84000$  кг) стенки для жесткого и упругого крепления груза на платформе при  $c_{\Gamma_1} = 2$  МН/м,  $v_0 = 5$  км/ч. Коэффициент трения между соприкасающимися поверхностями груза и платформы  $f_{\Gamma_1} = 0,35$ .

Таблица 1 – Значения продольных сил при разном числе вагонов стенки

В меганьютонах

Продольная сила	Количество вагонов стенки				
	1	2	3	4	5
$N_1$	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014
	0,8194	0,8193	0,8193	0,8193	0,8193
$N_2$	–	0,5406	0,5387	0,5387	0,5387
	–	0,3814	0,3799	0,3799	0,3799

Значения сил (см. таблицу 1) приведены для жесткого (верхняя строка) и упругого (нижняя строка) крепления груза на платформе.

Полученные результаты расчета свидетельствуют о том, что при соударении первый вагон стенки и набегающий вагон испытывают наибольшие продольные силы, значения которых практически не зависят от количества вагонов стенки. Выполненные вычисления демонстрируют, что для обеспечения точности результатов расчетов достаточно использования модели, включающей только три вагона стенки.

Адекватность и корректность разработанной математической модели устанавливалась путем сопоставления результатов расчета с результатами, приведенными в литературных источниках, а также полученными при натурных испытаниях на соударение вагонов. Все расчеты проведены в среде MathCAD [10, 11].

Рассмотрим процесс соударения одиночного вагона массой  $m_{в1}$  с одним или двумя вагонами стенки массой  $m_{в2}$ ,  $m_{в3}$  по принятой математической модели при жестком креплении грузов в вагонах. Результаты расчетов представлены в таблице 2 при следующих исходных данных: начальная скорость соударения вагонов  $v_0 = 2$  м/с;  $\varphi = 0,55$ ;  $c_{вj} = 11$  МН/м [9, с. 304]. Здесь  $N_1$  – продольная сила в междувагонной связи между набегающим вагоном и первым вагоном стенки, а  $N_2$  – продольная сила в междувагонной связи между первым и вторым вагонами стенки. В верхней строке приведены значения сил, полученные в результате расчета, а в нижней – согласно источнику [9, с. 305]. Результаты расчета по предлагаемой модели согласуются с результатами, приведенными в [9].

Таблица 2 – Значения продольных сил в междувагонных связях

Масса вагона, кг	Продольная сила, МН	
	$N_1$	$N_2$
$m_{в1} = m_{в2} = 85000$	1,734	–
	1,7	–
$m_{в1} = m_{в2} = 126000$	2,112	–
	2,1	–
$m_{в1} = m_{в2} = m_{в3} = 85000$	1,733	1,030
	1,7	1,05
$m_{в1} = m_{в2} = 85000; m_{в3} = 126000$	1,734	1,147
	1,7	1,30
$m_{в1} = m_{в2} = 126000; m_{в3} = 85000$	2,110	1,194
	2,1	1,10

По разработанным в Белорусском государственном университете транспорта материалам [3] были изготовлены реквизиты крепления на железнодорожной платформе четырех труб диаметром 1420 мм с полиэтиленовым покрытием (рисунок 1). В соответствии с принятой схемой погрузки четыре

трубы размещены на платформе в два яруса. Две трубы нижнего яруса размещены на опорах, закрепленных в стоечных скобах на боковых балках рамы платформы. Между трубами нижнего и верхнего ярусов установлены промежуточные опоры. Весь штабель труб прикреплен к раме платформы двумя поперечными обвязками. Для предохранения от повреждений полиэтиленового покрытия труб все опоры оснащены обрезиненными вкладышами, а канаты поперечной обвязки – подкладками. Смещение всех труб вдоль платформы ограничивается продольными канатами, которые охватывают блоки упоров на торцах платформы и крепятся на противоположных торцах труб посредством захватов. Блоки упоров закреплены в стоечных скобах на концевых балках рамы платформы. Предварительное натяжение упругих элементов крепления труб может осуществляться посредством натяжных барабанов и талрепов при выполнении погрузочных работ. Кроме того, при переходных режимах движения весь штабель труб может сместиться вдоль платформы и создать одностороннее натяжение упругих элементов продольного крепления труб как в направлении последующего соударения, так и в противоположном направлении.

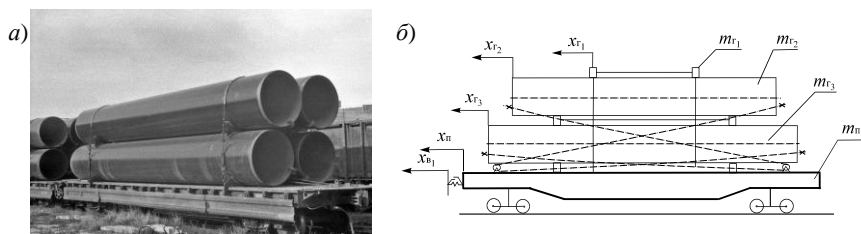


Рисунок 1 – Крепление труб диаметром 1420 мм на платформе:  
а – общий вид; б – расчетная схема

В таблице 3 приведены значения величин остаточного смещения труб нижнего яруса относительно платформы, полученные при натуральных испытаниях на соударение платформы, загруженной четырьмя трубами в два яруса, и в ходе расчетов. При испытаниях продольные перемещения труб после каждого соударения замерялись рулеткой с точностью до 5 мм, а также устанавливалась начальная скорость соударения. В то же время наличие ослабления или предварительного натяжения канатов крепления труб к платформе на момент первого соударения не фиксировалось.

При расчетах приняты следующие характеристики груза и креплений:  $m_{r1} = 10$  кг;  $m_{r2} = 13600$  кг;  $m_{r3} = 13700$  кг;  $c_{r1} = 2$  МН/м;  $c_{r2} = c_{r3} = 1$  МН/м;  $f_{r1} = 0,37$ ;  $h_{r1} = 2,96$  м;  $h_{r2} = 1,6$  м;  $l_{r2} = 2,96$  м;  $h_{r3} = 0$ . Вычисления проводились для разных величин предварительного натяжения упругих элементов крепления труб ( $\lambda_{r1}$ ).

Таблица 3 – Остаточное смещение труб после соударения вагонов

Номер соударения	Скорость набегающего вагона, км/ч	Остаточное продольное смещение труб нижнего яруса, мм		
		Эксперимент	Расчет	
		Предварительное натяжение канатов, м		
		не определялось	$\lambda_1 = 0,1$	
$\lambda_2 = \lambda_3 = 0,002$	$\lambda_2 = \lambda_3 = 0,003$			
1	6	35	39	38
2	5,5	45	42	41
3	6	45	48	45
4	6	45	53	45
5	6,5	45	49	46
6	7	50	48	47

Анализ полученных результатов позволяет сделать заключение, что величина остаточного смещения труб после каждого соударения вагонов зависит не только от скорости соударения, но и от предварительного натяжения (ослабления) упругих элементов крепления труб к платформе, а также сил сухого трения между ярусами груза.

Смещение труб в направлении удара сопровождается соответствующим натяжением канатов продольного крепления в этом же направлении и ослаблением натяжения канатов противоположного направления.

Таким образом, в ходе исследований установлено, что при расчетах соударений вагонов с трубами для нахождения наибольших продольных сил достаточную точность вычислений обеспечивает модель, включающая только три вагона стенки. Результаты сравнения значений продольных сил со значениями, которые получены иными авторами, показали отличие, не превышающее 9 %. Сравнение с результатами экспериментов показало, что, учитывая наблюдаемое на практике изменение предварительного натяжения канатов, можно получить значения смещений труб, точно соответствующие экспериментальным. Таким образом, предложенная математическая модель обеспечивает необходимую точность расчетов при анализе соударений вагонов, загруженных трубами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах № ЦМ-943. – Утв. 27.05.2003 МПС России. – М. : Юртранс, 2003. – 544 с.
- 2 Приложение 14 к СМГС «Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах». – М. : Планета, 2011. – 105 с.
- 3 Устройство для крепления труб на транспортном средстве: а. с. 1296454 СССР, МКИ В 60 Р 7/12 / В. М. Горский [и др.]. – № 3959723 ; заявл. 17.09.85 ; опубл. 15.03.87, Бюл. № 10. – 3 с.

4 Устройство для крепления труб на раме транспортного средства: пат. 10789 Респ. Беларусь, МПК (2006): В 60Р 7/00 / И. А. Ворожун, А. В. Заворотный ; заявитель Белорус. гос. ун-т трансп. – № а 20051196 ; заявл. 12.05.05 ; опубл. 30.06.08, Афіц. бюл. / Вынаходства, карысныя мадэлі, прамысловыя ўзоры. – 2008. – № 3. – С. 87.

5 **Ворожун, И. А.** Оценка динамических сил в элементах крепления труб на железнодорожной платформе / И. А. Ворожун // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2008. – № 1. – С. 60–64.

6 **Ворожун, И. А.** Моделирование взаимодействия ярусов груза и платформы при торможении поезда / И. А. Ворожун, А. В. Шилович // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 2. – С. 52–58.

7 **Varazhun, I.** Modeling of the interaction between cargo tiers and flatcar during the collision of cars / I. Varazhun, A. Zavarotny // Technolog. – 2013. – Рос. 5. – № 4. – P. 195–198.

8 **Chaganova, O. S.** Fastenings Parameters Determination for Highly Deformative Cargo, Taking into Account Its Durability During Transportation in Cars and Trains / O. S. Chaganova, I. A. Varazhun // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2018. – Vol. 7, No. 3. – P. 218–222.

9 **Вершинский, С. В.** Динамика вагонов / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов ; под ред. С. В. Вершинского. – М. : Транспорт, 1991. – 360 с.

10 **Брент, М.** MathCAD в инженерных расчетах / М. Брент. – М. : Крона-Век, 2010. – 368 с.

11 **Поршнев, С. В.** Компьютерное моделирование физических систем с использованием пакета MathCad / С. В. Поршнев. – М. : Горячая Линия – Телеком, 2015. – 320 с.

*I. A. VARAZHUN*

*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

## **CORRECTNESS ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF FLATCARS COLLISION AT AN ELASTIC FIXING METHOD FOR TIERS OF PIPES ON THE FLATCAR FRAME**

The analysis of the obtained results is carried out according to the accepted mathematical model of the collision process of a different number of cars with rigid and elastic methods of cargo fastening. There is investigated the effect of the friction coefficient between the tiers of pipes and the flatcar frame, as well as the pretensioning of elastic fastening elements on the value of residual longitudinal displacement of the pipes relative to the platform when it collides with the wall cars. The correctness of the mathematical model was established by comparing the calculation results with the results obtained during field tests for the cars collision. There are given the recommendations for the use of the wall cars number at performing calculations.

**Keywords:** flatcar, pipes, fastening of loads, dynamic forces, collision of cars.

Получено 09.11.2020