

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗАКРЕПЛЕННОГО ГРУЗА ПО ШИРИНЕ ВАГОНА

Райимжонов Искандар Баходир угли
Бойтураев Жохонгир Рустамович
Саидов Адхам Кучкор угли
Комилжоннова Зилола Зоҳидбек кизи
Дусназаров Мехрождиддин Сирождиддин угли
Республика Узбекистан г. Ташкент

Аннотация. В сфере грузовых перевозок остается не в полной мере, решенной прикладная задача по креплению грузов цилиндрической формы (например, труба большого диаметра), что подчёркивает актуальность задачи, рассматриваемой в данной статье.

Ключевые слова: вагон, крепление, логистика, груз, перемещение, натяг, упругий элемент

MODELING MOVEMENT OF THE FIXED LOAD ALONG THE WIDTH OF THE WAGON

Rayimjonov Iskandar Bahodir ugli
Boituraev Zhakhongir Rustamovich
Saidov Adham Kuchkor ugli
Komilzhonova Zilola Zohidbek kizi
Dusnazarov Mehrozhiddin Sirozhiddin ugli

Abstract. In the field of freight transportation, the applied problem of securing cylindrical cargo (for example, a large diameter pipe) remains not fully solved, which emphasizes the relevance of the task considered in this article.

Keywords: wagon, fastening, logistics, cargo, movement, tension, elastic element

Пусть точка M груза, к которой прикреплён гибкий упругий элемент под углом α к горизонту, под действием переносной поперечной силы инерции \bar{I}_{ey} получит малое перемещение $MM_0 = y$ (рис. 1).

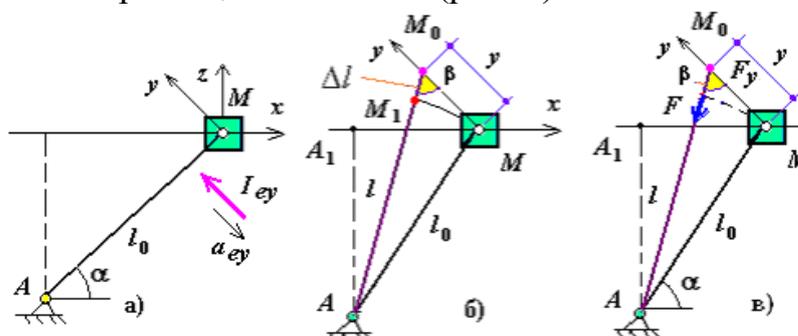


Рис. 1 Перемещения закрепленного груза поперек вагона

Требуется аналитически описать движения груза, прикреплённого к вагону гибкими упругими элементами.

Допустим, что связь между грузом и вагоном гладкая поверхность. Вследствие малого перемещения точки M на MM_0 , равного y , на неё будет действовать упругая сила (натяжения), модуль которого определяется по формуле Гука. Удлинение гибкого упругого элемента крепления Δl вследствие перемещения точки

$$\Delta l = l - l_0, \quad (1)$$

где l_0 – первоначальная длина гибкого упругого элемента крепления; l – длина элемента, достигнутая в результате смещения груза.

Обозначая длину отрезка от крепления нижнего основания гибкого элемента до груза за p расстояние от нижнего основания до точки крепления груза за h

Проекция упругой силы на ось y будет [1]

– в первом случае

$$F_y = -c(\sqrt{2py + y^2 + l_0^2} - l_0) \cos \beta \quad (2)$$

– во втором случае

где $c = c_i$ – жёсткость гибкого упругого элемента креплений груза (Н/м) [2]

$$c = \sum_{i=1,2,\dots} c_i = \sum_{i=1,2,\dots} \frac{EA_i}{l_i} \quad (3)$$

с учётом того, что EA_i – физико-геометрическая характеристика гибкого упругого элемента (Н), E – модуль упругости материала гибкого упругого элемента, скрученного из стальной отожжённой проволоки ($E = 1 \cdot 10^{10}$ Н/м²), A_i – площадь поперечного сечения гибкого упругого элемента (м²) (где n_i –

число нитей (шт.) и d_i – диаметр (мм) гибкого упругого элемента);

β – угол, образованный между направлением перемещения точки y и направлением гибкого упругого элемента крепления

$$1) \cos \beta = \frac{p+y}{\sqrt{2py + y^2 + l_0^2}}; \quad 2) \cos \beta = \frac{MM_0}{AM_0} = \frac{y}{\sqrt{l_0^2 + y^2}}.$$

Тогда равенству (2) придадим вид

$$1) F_y = -c(\sqrt{2py + y^2 + l_0^2} - l_0) \frac{p+y}{\sqrt{2py + y^2 + l_0^2}};$$

$$2) F_y = -c(\sqrt{l_0^2 + y^2} - l_0) \frac{y}{\sqrt{l_0^2 + y^2}}.$$

Следовательно, на точку M по оси y действует упругая сила

$$1) F_y = -c(p+y) \left(1 - \frac{l_0}{\sqrt{2py + y^2 + l_0^2}} \right); \quad 2) F_y = -cy \left(1 - \frac{l_0}{\sqrt{l_0^2 + y^2}} \right). \quad (4)$$

Для определения перемещения (сдвиг) груза поперёк вагона, используя последнюю формулу, на основе принципа Даламбера составляем условия равновесия (покоя) груза [2]

$$M\bar{a}_y = \bar{G} + \bar{N} + \bar{F} + \bar{I}_{cy}, \quad (5)$$

где \bar{a}_r – ускорение груза относительно пола вагона; \bar{G} – вес груза; \bar{N} – нормальная составляющая реакции связи; \bar{F} – упругая сила; \bar{I}_{cy} – переносная поперечная сила инерции груза.

Проецируя (5) на ось y , после элементарных математических выкладок с учётом (4) получим дифференциальное уравнение вынужденных колебаний груза

$$\ddot{y} + k^2(p + y) - k^2 l_0 \frac{p + y}{\sqrt{2py + y^2 + l_0^2}} = -a_{cy}; \quad (6)$$

где a_{cy} – переносное поперечное постоянное ускорение груза, допустимое значение которого равно $a_{cy} = 0.46g$ [3, 4]; k – круговая частота свободных колебаний (или собственная частота) (рад./с)

$$k = \sqrt{\frac{c}{M}}, \quad (7)$$

с учётом того, что M – масса груза (кг).

Дифференциальные уравнения (6) и (6,а) сводятся в первом случае посредством замены переменной y

$$y = z - p, \quad (8)$$

к виду (6, а) $\dot{y} = \dot{z}$; $\ddot{y} = \ddot{z}$.

После замены переменной получим

$$\ddot{z} + k^2 z - k^2 l_0 \frac{z}{\sqrt{z^2 + l_1^2}} = -a_{l(z-p)} = -a_{cy}, \quad (9)$$

где $l_1^2 = l_0^2 - p^2 > 0$, так как $l_0 > p$.

На основании последнего замечания, в дальнейшем будем изучать лишь дифференциальные уравнения вида:

$$\ddot{y} + k^2 y - k^2 l_0 \frac{y}{\sqrt{y^2 + l_0^2}} = -a_{cy}, \quad (10)$$

Таким образом, малое свободное колебание по поперечной оси y точки груза, к которой прикреплен гибкий упругий элемент, расположенный перпендикулярно к продольной оси вагона, описывается неоднородным *нелинейным* дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами.

Уравнения (9) представим в виде [5]

$$\ddot{y} = f(y), \quad (11)$$

где

$$f(y) = -k^2 y + k^2 l_0 \frac{y}{\sqrt{y^2 + l_0^2}} = -a_{cy}. \quad (12)$$

Для решения уравнения (11) введём новую переменную $q(y)$. Обозначим $\dot{y} = q(y)$. Тогда производная новой функции в виде $\ddot{y} = q'_y \dot{y}$ соответствует уравнению (11), т. е. $q(y)q'_y = f(y)$.

Кроме того, используя равенства $q(y)q'_y = \frac{1}{2}(q^2(y))'$, получим дифференциальное уравнение (11) в виде:

$$\frac{1}{2}(q^2(y))' = f(y). \quad (13)$$

Проинтегрируем последнее выражение в пределах от y_0 до y

$$\int_{y_0}^y \frac{1}{2} (q^2(y))' dy = \int_{y_0}^y f(y) dy.$$

Интегрируя левую часть последнего выражения, получим

$$\frac{1}{2} q^2(y) \Big|_{y_0}^y = \frac{1}{2} q^2(y) - \frac{1}{2} q^2(y_0) = \int_{y_0}^y f(y) dy,$$

где

$$y|_{t=0} = y_0 = 0, \quad q(y_0) = \dot{y}|_{t=0} = v_0.$$

С учётом (12) получим

$$\frac{1}{2} q^2(y) = \frac{1}{2} v_0^2 + \int_{y_0}^y \left(k^2 l_0^2 \frac{y}{\sqrt{y^2 + l_0^2}} - k^2 y - a_{ев} \right) dy. \quad (14)$$

Интегрируя (14), для функции $q(y)$ имеем равенство

$$\frac{1}{2} q^2(y) = \frac{1}{2} v_0^2 + k^2 l_0^2 \sqrt{y^2 + l_0^2} - \frac{1}{2} k^2 y^2 - a_{ев} y - \varphi(y_0),$$

где

$$\varphi(y_0) = +k^2 l_0^2 \sqrt{y^2 + l_0^2} - \frac{1}{2} k^2 y_0^2 - a_{ев} y_0 = \pm k^2 l_0^2,$$

так как $y_0 = 0$.

Окончательно имеем

$$\frac{1}{2} q^2(y) = \frac{1}{2} v_0^2 + k^2 l_0^2 \sqrt{y^2 + l_0^2} - \frac{1}{2} k^2 y^2 - a_{ев} y \mp k^2 l_0^2.$$

Учитывая, что $\dot{y} = q(y)$, можно записать

$$(\dot{y})^2 = v_0^2 + 2k^2 l_0^2 \sqrt{y^2 + l_0^2} - k^2 y^2 - 2a_{ев} y \mp 2k^2 l_0^2 = F(y),$$

или

$$(\dot{y})^2 = F(y). \quad (15)$$

В случае равновесия (состояния покоя) $y = 0$, тогда $\dot{y} = 0$ и сразу следует, что и $v_0 = 0$ и $a_{ев} = 0$.

Движение груза могут осуществляться лишь при положительном значении функции $F(y)$, т. е.

$$F(y) = v_0^2 + 2k^2 l_0^2 \sqrt{y^2 + l_0^2} - k^2 y^2 - 2a_{ев} y \mp 2k^2 l_0^2 > 0.$$

Уравнение (15) определяет два движения, соответствующие положительному и отрицательному направлениям начальной скорости, или

$$\frac{dy}{dt} = +\sqrt{F(y)}, \quad \text{или} \quad \frac{dy}{dt} = -\sqrt{F(y)}. \quad (16)$$

Рассмотрим первое уравнение. Если $F(y)$ не обращается в нуль при $y > 0$, то решение выразится из формулы

$$\int_{y_0}^y \frac{dy}{\sqrt{F(y)}} = t. \quad (17)$$

Причём, если интеграл в левой части существует для сколь угодно больших значениях $y = 0$, то y как функция от t неограниченно растёт.

Поэтому данная модель может описать значения параметров v_0 , k , l_0 и $a_{ев}$, при которых $F(y) > 0$ при всех y и характеризующих ситуацию создания условий угрожающей безопасности движения.

В случае правильного выбора k и l_0 , обязательно существование (в силу упругости) такого значения $y_1 > y_0 = 0$, при которой функция $F(y_1) = 0$, причём набор параметров v_0 , k , l_0 и $a_{ев}$ должен определять предельные значения y_1 , не превышающего заданного смещения поперёк вагона, т. е. $y_1 \leq b_{см}$, где $b_{см}$ – нормативное значение смещения груза поперёк вагона, определяемое по Техническим условиям [6].

Так как функция $F(y)$ имеет корень при $y = y_1$, т. е. $F(y_1) = 0$, то по формуле (17) определится время смещения груза t_1 , т. е.

$$\int_{y_0}^{y_1} \frac{dy}{\sqrt{F(y)}} = t_1. \quad (18)$$

При изменении времени $t \rightarrow t_1$ функция $F(y)$ убывает до 0 при $y \rightarrow y_1$. В этот момент t_1

$$\left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=t_1} = \sqrt{F(y_1)} = 0,$$

и ускорение (11)

$$\left. \frac{d^2y}{dt^2} \right|_{t=t_1} = f(y) = \left(\sqrt{F(y)} \right)'_t = \frac{1}{2\sqrt{F(y)}} F'_y \dot{y} = \left. \frac{F'_y}{2} \right|_{y=y_1}.$$

В силу убывания $F(y)$ имеет место $F'(y) < 0$. Поэтому получим

$$\left. \frac{d^2y}{dt^2} \right|_{t=t_1} = \left. \frac{F'_y}{2} \right|_{y=y_1} < 0 \quad \text{при } y = y_1. \quad (19)$$

Отрицательное ускорение сообщит грузу отрицательную скорость при $t > t_1$ и движение будет описываться уже вторым уравнением (16)

$$\dot{y} = -\sqrt{F(y)}. \quad (20)$$

Следовательно, груз будет периодически смещаться в пределах $-y_1 < y < y_1$, причём симметрично относительно начального положения груза.

В силу обратного движения (20) ускорение $a_{ев}$ приобретёт также отрицательное значение, и функция $F(y)$ обладает свойством:

$$F(y_1) = F(-y_1).$$

Период колебательных движений груза можно рассчитать по формуле

$$2T = 2 \int_{-y_1}^{y_1} \frac{dy}{\sqrt{F(y)}}. \quad (21)$$

Изучив основные свойства колебательных движений для уравнения (10), можно получить результаты для уравнения (6), заменой y на $y+p$, и l_0 на $l_0^2 - p^2$.

Дифференциальные уравнения, описывающие движения груза поперёк вагона, исследовались без учёта сил трения. Как показывает анализ, постоянная сила трения существенного влияния на решения дифференциального уравнения не имеет.

Исследования данных уравнений позволяет получить ряд важных физико-технических свойств движения груза поперёк вагона; принципы расчёта значений постоянных параметров, входящих в уравнения, при которых возможно создание условий, угрожающих безопасности движения; определяется период колебательных движений (21); описывается процесс возможных смещений груза поперёк вагона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах. Т. III. Специальные главы механики. – М.: Наука, 1973. – 487 с.

2. Туранов Х.Т., Бондаренко А.Н. Теоретическая механика в задачах погрузки-выгрузки и перевозки грузов. – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – 453 с.

3. Нормы для расчёта и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – ГосНИИВ. – М.: ВНИИЖТ, 1996. – 319 с. – С. 92.

4. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. Динамика вагона. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.

5. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Наука. 1971. – 576 с.

6. Приложение 14 к СМГС «Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах». – М.: Планета, 2005. – 191 с.

7 Vertical vibrations of a freight car as a uniaxial carriage from a wave of unevenness of the path Djabbarov, S., Saidivaliev, S., Abdullaev, B., ...Inagamov, S., Abdusaid, Y. E3S Web of Conferences 371 2023

8. Kinematic characteristics of the car movement from the top to the calculation point of the marshalling hump Djabbarov, S., Turanov, K., Gordienko, A., ...Saidivaliev, S., Djalilov, K. Advances in Intelligent Systems and Computing 1258 AISC, pp. 322-338 2021

9. Movement of the wagon on the marshalling hump under the impact of air environment and tailwind Djabbarov, S., Turanov, K., Gordienko, A., ...Saidivaliev, S. E3S Web of Conferences 164 2020

10. Designing the height of the first profile of the marshalling hump Djabbarov, S., Turanov, K., Gordienko, A., ...Saidivaliev, S. E3S Web of Conferences 164 202