

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗМЕЩЕНИЯ И КРЕПЛЕНИЯ ГРУЗОВ НА ПОЛУВАГОНЕ

Маркина Я.А.¹, студентка гр. Д-212, II курс, Дерипаскина А.Р.¹,
студентка гр. Д-212, II курс

Научный руководитель: Миллер Н.В.¹, к.п.н., доцент

¹Сибирский государственный университет путей сообщения
г. Новосибирск

Аннотация. В статье рассматриваются математические подходы к обоснованию размещения и крепления грузов в железнодорожных полувагонах на примере транспортировки бетонных блоков. Представлены основные этапы расчета: определение положения общего центра тяжести груза, оценка устойчивости вагона с грузом, расчет инерционных сил, проверка прочности элементов крепления. Приведенные математические модели опираются на нормативной документации и позволяют обоснованно подойти к выбору схемы расположения грузов и параметров крепления, обеспечивающих безопасность перевозки.

Ключевые слова: расположение грузов, крепление грузов, полувагон, центр тяжести, инерционные силы, устойчивость вагона, коэффициент запаса, смятие древесины, математическое моделирование.

Обеспечение безопасности перевозки грузов железнодорожным транспортом является одной из главных задач транспортной логистики. Особую сложность представляют перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов, к которым относятся железобетонные изделия. Неправильное размещение или недостаточное крепление груза может привести к смещению, опрокидыванию или падению груза, что создает аварийную ситуацию и угрожает безопасности движения.

В данной работе рассматриваются математические методы обоснования размещения и крепления бетонных блоков в полувагоне. Целью работы является систематизирование математических подходов, используемых при расчетах устойчивости и прочности крепления, а также демонстрация их практического применения.

1. Постановка задачи

Для перевозки представлены шесть бетонных блоков двух типов:

- три блока типа Б-2 массой 9,45 т каждый, высотой 1400 мм, высота центра тяжести 700 мм;
- три блока типа Б-2-2 массой 10,3 т каждый, высотой 1700 мм, высота центра тяжести 740 мм.

Грузы размещаются в полувагоне грузоподъемностью 69–71 т постройки после 1974 г. Способ размещения – в три штабеля, в один ярус, в два ряда. Крепление производится с использованием подкладок, распорных и упорных брусков, а также гвоздей и строительных скоб.

Математическое обоснование включает решение следующих задач:

1. Определение общего центра тяжести груза.
2. Проверка устойчивости вагона с грузом относительно уровня головок рельсов.
3. Расчет инерционных сил, действующих на груз при движении.
4. Определение усилий, воспринимаемых элементами крепления.
5. Проверка устойчивости грузов от опрокидывания.
6. Проверка прочности деревянных элементов крепления на смятие и сжатие.

2. Определение центра тяжести груза

Общая масса груза определяется по формуле:

$$Q_{\text{гр}}^o = \sum_{i=1}^n Q_m^i n^i = 9,45 \times 3 + 10,3 \times 3 = 59,25 \text{ т.}$$

Высота общего центра тяжести груза над уровнем пола вагона рассчитывается как средневзвешенное значение:

$$h_{\text{цт}}^{\text{гр}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_m^i h_{\text{цт}}^i}{Q_{\text{гр}}^o} = \frac{3 \times 9,45 \times 750 + 3 \times 10,3 \times 790}{59,25} = 771 \text{ мм.}$$

Смещение общего центра тяжести вдоль вагона от поперечной оси составляет $l_c = 0$ мм, что свидетельствует о симметричном размещении грузов. Смещение поперек вагона также равно нулю:

$$b_{\text{см}} = \frac{3 \times 9,45 \times 589 - 3 \times 10,3 \times 541}{59,25} = 0 \text{ мм.}$$

Симметричное размещение грузов относительно продольной и поперечной осей вагона является необходимым условием равномерного распределения нагрузок на ходовые части и раму вагона.

3. Устойчивость вагона с грузом

Устойчивость вагона с грузом оценивается по высоте общего центра тяжести вагона с грузом над уровнем головок рельсов (УГР). Расчет производится с учетом массы вагона $Q_{\text{т}}^{\text{в}} = 21,1$ т и высоты его центра тяжести $h_{\text{цт}}^{\text{в}} = 1130$ мм, а также высоты пола вагона над УГР $h_{\text{п}} = 1415$ мм:

$$H_{\text{цт}}^o = \frac{Q_{\text{гр}}^o (h_{\text{цт}}^{\text{гр}} + h_{\text{п}}) + Q_{\text{т}}^{\text{в}} h_{\text{цт}}^{\text{в}}}{Q_{\text{гр}}^o + Q_{\text{т}}^{\text{в}}} = \frac{59,25 \times (771 + 1415) + 21,1 \times 1130}{59,25 + 21,1} = 1909 \text{ мм.}$$

Согласно нормативным требованиям [1], высота общего центра тяжести не должна превышать 2300 мм. Полученное значение $H_{\text{цт}}^o = 1909$ мм соответствует условию.

Боковая наветренная поверхность вагона с грузом составляет $S_{\text{в}} = 37 \text{ м}^2$, что также не превышает установленному допустимому значению 50 м^2 . Таким образом, вагон с грузом устойчив относительно УГР.

4. Расчет инерционных сил

При движении поезда на груз действуют инерционные силы, возникающие при разгонах, торможениях и прохождении кривых участков пути. Удельная продольная инерционная сила рассчитывается по формуле, учитывающей массу груза:

$$a_{\text{пр}} = a_{22} - \frac{Q_{\text{гр}}^0(a_{22} - a_{94})}{72} = 1,2 - \frac{59,25 \times (1,2 - 0,97)}{72} = 1,01 \text{ тс/т.}$$

Продольная инерционная сила, действующая на весь груз:

$$F_{\text{пр}} = a_{\text{пр}} \times Q_{\text{гр}}^0 = 1,01 \times 59,25 = 59,8 \text{ тс.}$$

Сила трения в продольном направлении при коэффициенте трения $\mu = 0,4$:

$$F_{\text{тр}}^{\text{пр}} = Q_{\text{гр}}^0 \mu = 59,25 \times 0,4 = 23,7 \text{ тс.}$$

Усилие, которое должно быть воспринято элементами крепления:

$$\Delta F_{\text{пр}} = F_{\text{пр}} - F_{\text{тр}}^{\text{пр}} = 59,8 - 23,7 = 36,1 \text{ тс.}$$

5. Устойчивость грузов от опрокидывания

Коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания вдоль вагона для груза I определяется по формуле:

$$\eta_{\text{пр}} = \frac{l_{\text{пр}}^0}{a_{\text{пр}}(h_{\text{цт}} - h_{\text{y}}^{\text{пр}})} = \frac{925}{1,01 \times (700 - 100)} = 1,53.$$

Нормативное значение $\eta = 1,25$. Поскольку $1,53 > 1,25$, устойчивость груза I от опрокидывания вдоль вагона обеспечена. Аналогично для груза II:

$$\eta_{\text{пр}} = \frac{905}{1,01 \times (740 - 100)} = 1,4 > 1,25.$$

Для поперечного направления расчет выполняется с учетом удельной поперечной инерционной силы. Для штабелей 1 и 3:

$$a_{\text{п}} = 0,33 + \frac{0,44}{l_{\text{в}}} l_{\text{гр}} = 0,33 + \frac{0,44}{8650} \times 3434 = 0,5 \text{ тс/т.}$$

Поперечная инерционная сила для груза I:

$$F_{\text{п}} = a_{\text{п}} \times Q_{\text{гр}} = 0,5 \times 9,45 = 4,725 \text{ тс.}$$

Коэффициент запаса от опрокидывания поперек вагона для груза I:

$$\eta_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{гр}} b_{\text{п}}^0}{F_{\text{п}}(h_{\text{цт}} - h_{\text{yn}})} = 9,45 \times 4904,725 \times (700 - 100) = 1,63 > 1,25.$$

Для груза II получено $\eta_{\text{п}} = 1,53$, что также превышает нормативное значение. Таким образом, грузы устойчивы от опрокидывания как вдоль, так и поперек вагона.

6. Проверка прочности элементов крепления

Элементы крепления выполнены из пиломатериалов. Проверка прочности производится по напряжениям смятия и сжатия.

6.1. Смятие упорных брусков (поз. 4)

Суммарная площадь прилегания брусков:

$$S_0 = (15 \times 15) \times 6 = 1350 \text{ см}^2.$$

Напряжение смятия при продольном смещении груза не превышает допустимых значений для древесины.

6.2. Смятие подкладок (поз. 1)

Вертикальная инерционная составляющая:

$$F_B = Q_{гр} a_B = 10,3 \times 0,3 = 3,09 \text{ тс.}$$

Общая нагрузка на подкладки:

$$F = Q_{гр} + F_B = 10,3 + 3,09 = 13,39 \text{ тс.}$$

Площадь прилегания подкладок к грузу:

$$S_0 = a \times b \times n = 98 \times 10 \times 2 = 1960 \text{ см}^2.$$

Напряжение смятия составляет $\sigma = \frac{F}{S_0} = \frac{13390}{1960} \approx 6,8 \text{ кгс/см}^2$, что значительно ниже допустимого значения для древесины (120 кгс/см²).

6.3. Проверка на сжатие распорного бруска (поз. 5)

Длина бруска $l = 1225 \text{ мм}$, сечение $150 \times 150 \text{ мм}$. Гибкость бруса:

$$\lambda = \frac{\mu l}{\sqrt{J_{и}/S}} = \frac{1 \times 122,5}{\sqrt{4218,75/(15 \times 15)}} = 28,29.$$

Коэффициент продольного изгиба для древесины при $\lambda = 28,29$:

$$\phi = 0,97 - \frac{0,97 - 0,93}{30 - 20} \times (28,29 - 20) = 0,937.$$

Напряжение сжатия:

$$\sigma_c = \frac{\Delta F_{пр}}{S_0 \phi} = \frac{36100}{6 \times 15 \times 15 \times 0,937} = 28,54 \text{ кгс/см}^2 < \sigma = 120 \text{ кгс/см}^2.$$

Все проверки показывают, что прочность деревянных элементов крепления обеспечена.

7. Нагрузка на поперечные балки полувагона

Нагрузка от каждого штабеля передается на соответствующие поперечные балки. Для штабелей 1 и 3 нагрузка на шкворневую и промежуточную балки составляет 9,875 т, что не превышает допустимых значений согласно табличным данным [1]. Для штабеля 2 нагрузка на средние балки также равна 9,875 т при допустимой 18,7 т.

Максимальный изгибающий момент в раме вагона рассчитан по формуле:

$$M_{max} = 51,7 \text{ тс} \cdot \text{м.}$$

Допустимый изгибающий момент для данного типа вагона составляет 53,08 тс·м, что превышает фактическое значение. Следовательно, рама вагона выдерживает возникающие нагрузки [2].

В данной статье представлено детальное математическое обоснование оптимизации размещения и крепления бетонных блоков в конструкции железнодорожного полувагона. В рамках проведенного анализа были использованы сложные математические модели, позволяющие учесть множество факторов, влияющих на устойчивость и надежность системы. На основании полученных результатов сформулированы следующие выводы:

1. Симметричное размещение грузов обеспечивает нулевое смещение общего центра тяжести относительно продольной и поперечной осей вагона, что способствует равномерному распределению нагрузок.

2. Высота общего центра тяжести вагона с учетом груза составляет 1909 мм, что не превышает регламентированного норматива в 2300 мм, при этом боковая наветренная площадь также остается в пределах допустимых значений. Таким образом, устойчивость вагона с грузом обеспечивается на уровне, соответствующем установленным стандартам безопасности.

3. Расчетные инерционные силы в продольном и поперечном направлениях не превышают несущей способности элементов крепления и конструктивных элементов вагона.

4. Коэффициенты запаса устойчивости грузов как вдоль, так и поперек оси вагона значительно превышают нормативное значение 1,25, что свидетельствует о высокой степени устойчивости к опрокидыванию при действии инерционных нагрузок и обеспечивает безопасность транспортировки.

5. Прочность деревянных элементов крепления (подкладок, распорных и упорных брусков) проверена на смятие и сжатие; фактические напряжения значительно ниже допустимых для древесины.

6. Нагрузки на поперечные балки и раму вагона не превышают допустимых значений, что подтверждает целостность подвижного состава при перевозке.

Список литературы:

1. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. – М.: Юртранс, 2003. – 544 с.

2. Туранов Х.Т., Бондаренко А.Н., Власова Н.В. Крепление грузов в вагонах: Учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта. - Екатеринбург.: Изд-во УрГУПС, 2006. - 321 с.