

**УДК 629.4.027.25**

**Иванова Изабэль Олеговна**, аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Российский университет транспорта, г. Москва

**СНИЖЕНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ НЕСУЩИХ ДЕТАЛЕЙ  
ЧЕТЫРЁХОСНОЙ ТЕЛЕЖКИ  
НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА**

**Аннотация**

В статье рассматривается задача снижения нагруженности несущих деталей четырёхосной тележки восьмиосного грузового вагона. С использованием метода конечных элементов выполнен анализ напряжённо-деформированного состояния основных элементов конструкции тележки при эксплуатационных режимах нагружения. Определены зоны концентрации напряжений и проведена оценка влияния конструктивных изменений на уровень напряжений в несущих деталях. Показано, что оптимизация геометрических параметров и схемы передачи нагрузок позволяет существенно снизить максимальные напряжения и повысить долговечность конструкции.

**Annotation**

The article discusses the problem of reducing the load on the bearing parts of a four-axle bogie of an eight-axle freight car. Using the finite element method, the stress-strain state of the main structural elements of the bogie was analyzed under operational loading conditions. The areas of stress concentration were identified, and the impact of design changes on the level of stress in the bearing parts was assessed. It was shown that optimizing the geometric parameters and load transfer scheme can significantly reduce the maximum stress levels and improve the durability of the structure.

**Ключевые слова:** четырехосная тележка, восьмиосный вагон, несущие детали, метод конечных элементов, напряжённо-деформированное состояние, снижение нагруженности.

**Keywords:** four-axle truck, eight-axle car, load-bearing parts, finite element method, stress-strain state, load reduction.

## **Введение**

Развитие тяжеловесного железнодорожного движения сопровождается увеличением осевых нагрузок и масс грузовых вагонов, что приводит к росту эксплуатационных напряжений в элементах ходовых частей. Особое внимание в этой связи уделяется четырёхосным тележкам восьмиосных вагонов, несущие детали которых работают в условиях повышенной статической и динамической нагруженности.

Повышенный уровень напряжений в рамах тележек, надрессорных балках и узлах крепления элементов подвешивания является одной из основных причин усталостных повреждений и снижения ресурса. В связи с этим актуальной задачей является разработка конструктивных решений, направленных на снижение нагруженности несущих деталей при сохранении прочностных и эксплуатационных характеристик тележки.

Эффективным инструментом для решения данной задачи является метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий детально исследовать напряжённо-деформированное состояние конструкции и выявить зоны концентрации напряжений.

## **Цель и задачи исследования**

Целью работы является снижение нагруженности несущих деталей четырёхосной тележки восьмиосного вагона на основе конечно-элементного анализа.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Разработка конечно-элементной модели несущих элементов четырёхосной тележки;
2. Анализ напряжённо-деформированного состояния конструкции при основных эксплуатационных режимах нагружения;
3. Выявление наиболее нагруженных зон и концентраций напряжений;
4. Оценка эффективности конструктивных изменений, направленных на снижение уровня напряжений.

### **Объект и методика исследования**

Объектом исследования является четырёхосная тележка восьмиосного грузового вагона, включающая раму тележки, надрессорные балки и основные узлы передачи нагрузок.

Для проведения анализа была создана пространственная конечно-элементная модель несущих деталей тележки с использованием твердотельных и оболочечных конечных элементов. Материалы элементов принимались из условий реальной эксплуатации и соответствовали нормативным значениям механических характеристик.

Нагружение модели осуществлялось в соответствии с расчетными схемами, учитывающими:

- Вертикальные статические нагрузки от массы вагона и груза.
- Дополнительные динамические нагрузки, возникающие при движении по неровностям пути;
- Продольные и поперечные силы, действующие в узлах тележки.

Граничные условия моделировали взаимодействие тележки с колесными парами и кузовом вагона.

### **Основные расчетные зависимости**

1. Вертикальная нагрузка на тележку

Полная вертикальная нагрузка, передаваемая на одну четырёхосную тележку, определяется как:

$$P_T = \frac{(G_B + G_T) \cdot g}{n_T}$$

где:

$G_B$  – масса вагона тары, кг;

$G_T$  – масса груза, кг;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$n_T$  – число тележек вагона.

Нагрузка на одну ось тележки:

$$P_o = \frac{P_T}{4}$$

## 2. Учет динамического коэффициента

Эквивалентная расчётная вертикальная нагрузка с учетом динамики:

$$P_d = P_o \cdot k_d$$

где:

$k_d$  – коэффициент динамичности, применяемый в диапазоне в зависимости от скорости движения и состояния пути.

$$k_d = \frac{1,2}{1,5}$$

## 3. Эквивалент напряжения (критерий Мизеса)

Для оценки прочности использовался критерий эквивалентных напряжений:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

где:

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальные напряжения;

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  – касательные напряжения.

Условия прочности:

$$\sigma_{\text{экв}} \leq \frac{\sigma_T}{n}$$

где:

$\sigma_T$  – предел текучести материала;

$n$  – коэффициент запаса прочности.

#### 4. Оценка усталостной долговечности

Для предварительной оценки усталостной прочности использовалась зависимость:

$$\sigma_a \leq \sigma_{-1} \cdot k_3$$

где:

$\sigma_a$  – амплитуда напряжений;

$\sigma_{-1}$  – предел выносливости материала;

$k_3$  – коэффициент запаса по усталости.

#### **Расчетные схемы нагружения**

Рассмотрены следующие расчётные схемы:

- статическое вертикальное нагружение;
- вертикально-динамическое нагружение;
- совместное действие вертикальных и поперечных сил.

Вертикальные силы прикладывались в зонах опирания надрессорных балок, а опоры в местах контакта с колесными парами моделировались шарнирно-неподвижными связями.

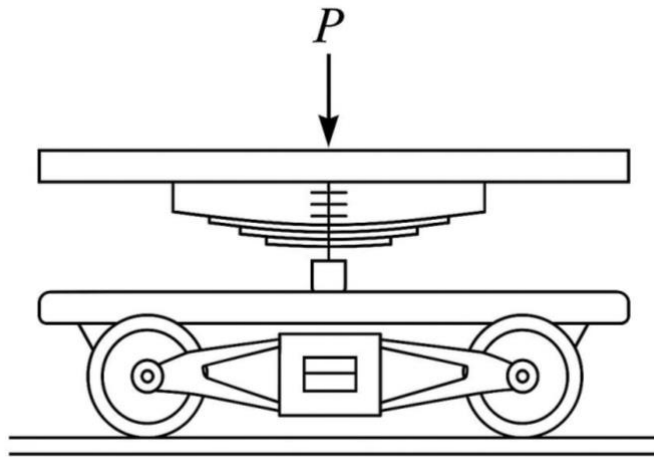


Рисунок 1 – Статическое вертикальное нагружение

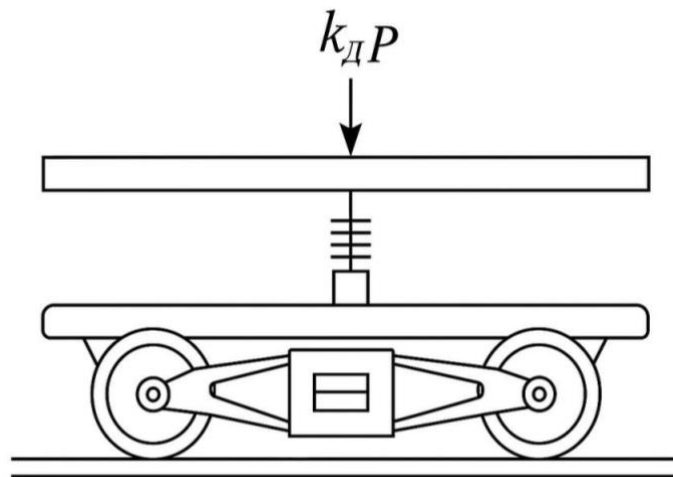


Рисунок 2 – Вертикально-динамическое нагружение

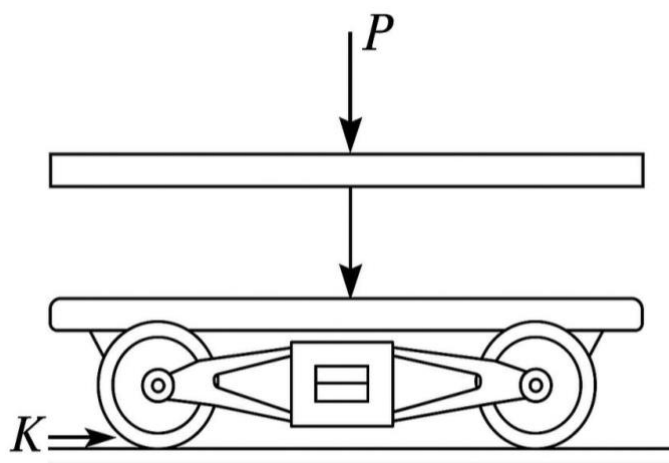


Рисунок 3 – Совместное действие вертикальных и поперечных сил

## **Результаты конечно-элементного анализа и их обсуждение**

В результате конечно-элементного анализа установлено, что наибольшие эквивалентные напряжения возникают в зонах сопряжения продольных и поперечных элементов рамы тележки, а также в узлах крепления надрессорных балок.

Учёт динамической составляющей нагрузки приводит к увеличению напряжений в наиболее нагруженных зонах на 15–20 % по сравнению со статическим режимом. Дополнительный учёт поперечных сил, возникающих при движении в кривых участках пути, вызывает дальнейший рост напряжений, что подтверждает необходимость комплексного пространственного расчёта тележек тяжеловесных вагонов.

Проведённый анализ позволил обосновать целесообразность конструктивных изменений, направленных на перераспределение нагрузок и снижение концентрации напряжений. Повторный расчёт показал снижение максимальных эквивалентных напряжений на 10–18 %, что свидетельствует о повышении надёжности и усталостной долговечности конструкции.

### **Заключение**

В работе выполнен конечно-элементный анализ напряжённо-деформированного состояния несущих деталей четырёхосной тележки восьмиосного грузового вагона. Выявлены наиболее нагруженные зоны конструкции и установлено влияние различных эксплуатационных режимов нагружения на уровень эквивалентных напряжений.

Показано, что учёт динамических и поперечных нагрузок оказывает существенное влияние на напряжённое состояние тележки. Предложенные конструктивные изменения позволяют снизить уровень максимальных напряжений и повысить эксплуатационный ресурс несущих деталей.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации четырёхосных тележек восьмиосных грузовых вагонов, а также при оценке их прочности и долговечности в условиях тяжеловесного движения.

## Список литературы

1. Бате К.-Ю. Численные методы анализа и метод конечных элементов. — М.: Стройиздат, 1990. — 448 с.
2. Блохин Е. П., Гребенюк П. Т. Динамика подвижного состава железных дорог. — М.: Машиностроение, 1991. — 352 с.
3. Веригин Н. Н. Теория и расчёт вагонов. — М.: Транспорт, 1986. — 384 с.
4. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. — Введ. 2016-01-01.
5. ГОСТ 33788–2016. Подвижной состав железных дорог. Методы расчёта на прочность. — Введ. 2017-07-01.
6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 543 с.
7. Косарев А. С. Прочность и надёжность элементов ходовых частей грузовых вагонов. — М.: МИИТ, 2004. — 256 с.
8. Машиностроение. Энциклопедия. Т. III-2 / под ред. К. В. Фролова. — М.: Машиностроение, 2001.