

УДК 629.4.02:656.073

DOI: 10.34029/2311-4061-2021-139-2-18-24

*Д-р техн. наук Путято А. В.*

*Д-р техн. наук Шимановский А. О.*

*Инженер Ворожун И. А.*

### АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ РАМЫ ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

**Ключевые слова:** вагон, платформа, трубы, крепление грузов, динамические силы, соударение вагонов, конечно-элементное моделирование, напряжения.

#### Введение

Необходимость повышения скорости движения поездов, а также расширение ассортимента перевозимых грузов требуют совершенствования, как конструкций вагонов, так и способов размещения и крепления грузов в них. Подвижной состав железных дорог представляет сложную механическую систему, а обеспечение безопасности его движения требует проведения глубоких и всесторонних исследований. Выполненный анализ показывает, что одной из основных причин, приводящих к разрушению и повреждению, как перевозимых грузов, так и самих вагонов, является нарушение режимов эксплуатации подвижного состава при сортировочной работе. Аналогичная ситуация будет сохраняться и в обозримом будущем, поскольку наблюдается тенденция отставания оперативной замены на эксплуатируемом подвижном составе устаревших конструкций поглощающих аппаратов на более энергоёмкие, при изменении нормативных требований к ним, связанных с увеличением осевой нагрузки вагонов и интенсификацией их использования.

С другой стороны, номенклатура перевозимых грузов все время расширяется, что требует разработки подходов, позволяющих обеспечить их безопасную транспортировку. Оснащение вагонного парка достаточным количеством специализированного подвижного состава или применение в конструкциях

существующих вагонов более эффективных поглощающих аппаратов и подвижных хребтовых балок, обеспечивающих надёжность вагонов и сохранность перевозимых грузов, требуют значительных капитальных вложений. В связи с этим при транспортировке длинномерных и тяжеловесных грузов возникает необходимость проведения работ по оснащению существующих вагонов оборудованием, позволяющим уменьшить динамические силы, действующие как на вагон, так и на перевозимый груз, например, путём дополнительного подрессоривания груза относительно вагона в продольном направлении. Изменение сил в элементах таких средств крепления при соударениях вагонов может стать причиной повреждения транспортируемого груза и подвижного состава. Поэтому возникает необходимость проведения исследований, связанных с анализом прочности конструкций вагонов под действием динамических нагрузок от элементов крепления.

#### Анализ последних исследований и публикаций

Размещение и крепление грузов на открытом подвижном составе регламентируется специальными нормативными документами [1–3]. В них указывается, что расчет креплений следует осуществлять исходя из значений удельных продольных и поперечных горизонтальных, а также вертикальных инерционных сил. Такой подход справедлив для случая жесткого крепления груза. Однако при транспортировке массивных и крупногабаритных грузов оказывается, что под действием переменных нагрузок, вызванных соударением вагонов и движением по кривым, крепления испытывают значительные деформации, что приводит к изменению возникающих в них сил [4]. Поэтому исследователи в последние годы обратили внимание на необходимость анализа таких сил при переходных режимах движения железнодорожного подвижного состава [5].

Так, в работах [6, 7] рассмотрен расчет крепления массивных грузов с учетом их возможного смещения относительно пола вагона-платформы. Авторами исследований учтено изменение сил упругости растяжек, обусловленное изменением их длины. В статье [8] рассмотрена методика расчета эле-

ментов крепления грузов с учетом статической неопределимости системы. В исследовании [9] выполнена оценка прочности креплений груза, оборудованного грузовыми петлями, с учетом изменения сил их натяжения при смещении груза после ряда соударений вагонов. В работе [10] на основе анализа обобщенной модели крепления груза в вагоне показано, что связи с мягкими характеристиками существенно повышают сохранность при грузоперевозке, по сравнению с линейно упругими связями, и на основе этого рекомендовано использование пневмооболочек.

Аналізу прочности конструкций вагонов, под действием приложенных к ним сил, посвящено значительное количество исследований. Так в работе [11] для исследования транспортировки труб на вагоне-платформе авторами использован вычислительный комплекс «Универсальный механизм», а его результаты в дальнейшем применены при прочностном анализе в пакете Femap. Конечно-элементное моделирование нашло применение также при определении напряженно-деформированного состояния рамы длиннобазной платформы [12], кузова вагона-платформы для перевозки лесных грузов при ударе [13] и вагона бункерного типа, перефилированного в вагон-платформу [14]. В статье [15] анализируется прочность конструкции вагона-зерновоза с целью выбора рационального способа модернизации для продления срока службы. Во всех рассмотренных выше работах изучаются случаи типового приложения нагрузок, в то время как в статье [16] потребовалось учесть влияние на прочность конструкции вагона, транспортируемого в пароме, от его колебаний. Однако нам не удалось найти работы, в которых бы рассматривался анализ прочности конструкций под действием нагрузок не только от перевозимого груза, но и от средств его крепления.

#### **Цели и задачи исследования**

Особенностями перевозки труб диаметра 1420 мм на универсальных вагонах-платформах являются невозможность полного использования их грузоподъемности и применение крепежных реквизитов одноразового пользования. Предложены новые варианты креплений, обеспечивающие погрузку на вагон пяти труб [17] в отличие от рекомендуемых нормами [1] четырех. Выполненный анализ показал, что в этом случае возник-

ающие в креплениях значительные нагрузки могут стать причиной повреждения груза и кузова и неблагоприятно сказываются на безопасности эксплуатации подвижного состава. Следовательно, в таких случаях расчет креплений груза должен сопровождаться анализом прочности кузова. Поэтому целью представленной работы стал анализ прочности несущей конструкции платформы под действием динамических нагрузок от средств крепления на ней труб большого диаметра. Для этого потребовалось определить максимальные значения сил, возникающих в элементах крепления, разработать конечно-элементную модель несущей конструкции платформы и осуществить расчет напряжений, возникающих в ней под действием динамических нагрузок.

#### **Определение сил, возникающих в элементах креплений при соударении вагонов**

При транспортировке на платформе пяти труб диаметра 1420 мм их продольное крепление возможно осуществить двумя основными способами [18]: труб всех ярусов непосредственно к раме платформы (рис. 1а) или труб нижнего яруса к раме платформы, а каждого последующего яруса – к трубам предыдущего (рис. 1б).

Для определения сил, действующих на элементы крепления труб и раму платформы в процессе соударения вагонов, использованы методики, описанные в работах [10, 19]. Сравнение результатов вычислений по разработанным моделям [10, 18] и экспериментальных данных, приведенное в публикации [20], продемонстрировало их хорошее соответствие.

Выполнены расчёты соударения вагонов для двух указанных выше вариантов продольного крепления труб. Они выполнены с учетом масс каждой трубы 6800 кг, платформы – 21000 кг, вагона-стенки – 84000 кг. Коэффициенты трения между телами системы принимались равными 0,35, а коэффициенты жесткости упругих элементов крепления – 2 МН/м. Вычисления выполнялись для начальной скорости соударения вагонов 9 км/ч. Их результаты представлены в таблице 1. Приведенная на рисунке 1 схема а соответствует креплению труб всех ярусов непосредственно к платформе, а схема б – поярусному креплению. Представленные значения сил в дальнейшем были использованы в качестве исходных данных при анализе прочности кузова вагона-платформы.

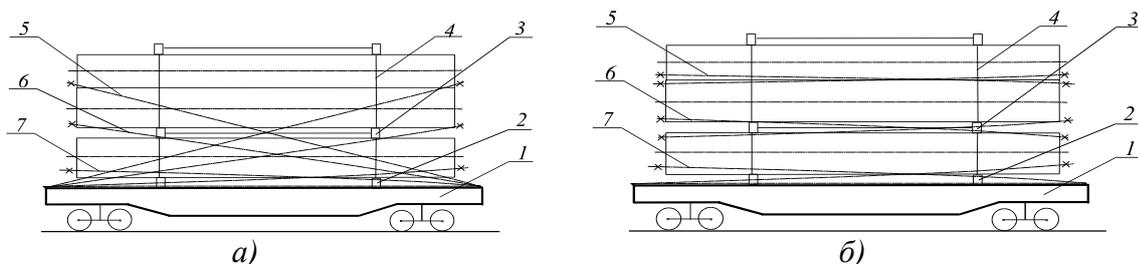


Рис. 1 – Схеми кріплення труб на вагон-платформі:

1 – платформа; 2 – опори для труб нижнього яруса; 3 – проміжні опори для труб верхнього яруса; 4 – поперечна обв'язка; 5, 6, 7 – елементи продольного кріплення труб верхнього, середнього і нижнього ярусів

Табл. 1 – Динамічні показателі схем кріплення труб на вагон-платформі

Найменування показателів	Значення	
	Схема а	Схема б
Найбільше значення сил в еластичних елементах продольного кріплення верхньої труби, кН	122,5	95
Найбільше значення сил в еластичних елементах продольного кріплення труб середнього яруса, кН	248,8	234
Найбільше значення сил в еластичних елементах продольного кріплення труб нижнього яруса, кН	249,6	311
Найбільше значення сил в еластичних елементах кріплення проміжних опор, кН	11,15	17,62
Найбільше значення сил в еластичних елементах кріплення поперечної обв'язки, кН	3,756	17,870
Найбільше значення сил в автосцепці платформи, МН	1,447	1,438

**Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния несущей конструкции вагона.**

В качестве объекта исследования принят вагон-платформа модели 13-401, одной из

наиболее часто встречающейся в инвентарном парке Белорусской железной дороги. На рисунке 2 показана схема приложения к вагон-платформе расчётных сил.

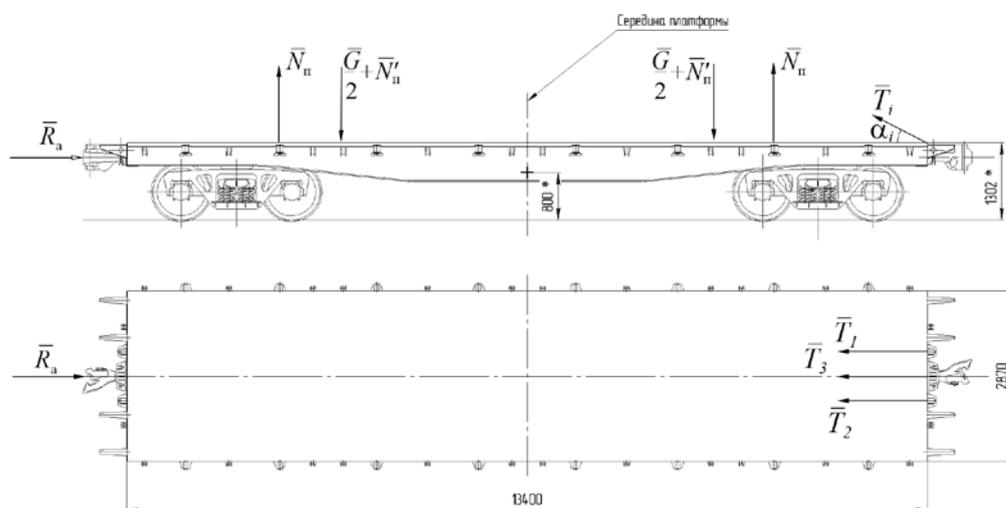


Рис. 2 – Схема приложення расчётних сил к вагон-платформі моделі 13-401

Для оценки прочности несущей конструкции платформы на основе комплекта конструкторской документации разработана конечно-элементная модель в программном комплексе DSMFem.

Несущая конструкция вагона изготовлена из стали углеродистой обыкновенного качества Ст3сп, предел текучести которой, принятый в качестве допускаемых напряжений, равен 245 МПа. Следует отметить, что несущие конструкции современных вагонов-платформ изготавливаются преимущественно из конструкционных сталей 09Г2, 09Г2С, 09Г2Д, которые имеют существенно большее значение предела текучести. Модуль упруго-

сти материала несущей конструкции принят равным 210 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,3.

При построении модели использовались два типа конечных элементов – плоские пластинчатые 3-х и 4-х угольные. Оба типа элементов имеют три степени свободы в каждом узле. Они обладают жесткостью при растяжении/сжатии, сдвиге в плоскости элемента и изгибе и кручении в любых направлениях. Параметрами элементов являются их толщины, материал и сечение. Полученная конечно-элементная модель (рис. 3) включает 14925 узлов и 12204 элемента.

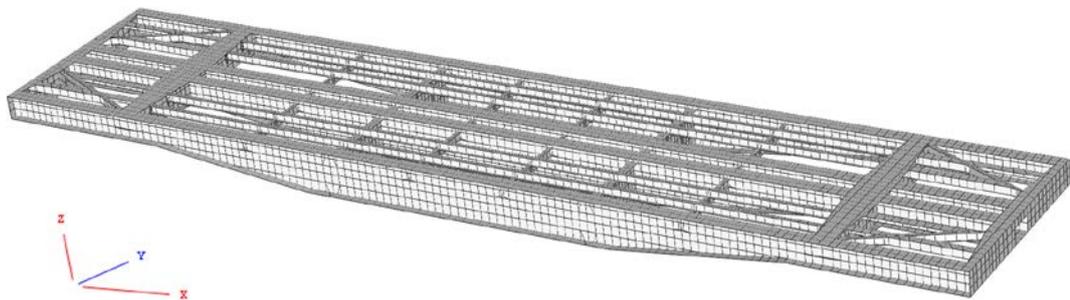


Рис. 3 – Конечно-элементная модель рамы вагон-платформы

Продольная сила  $R_a$ , обусловленная соударением вагонов, принята равной 3,5 МН и приложена к заднему упору автосцепного устройства. Чтобы учесть действие на конструкцию груза и средств крепления, приняты во внимание сила тяжести перевозимого груза, силы в упругих элементах поперечной обвязки и проекции сил, возникающих в элементах продольного крепления труб. Кинематические граничные условия включают в себя

ограничение степеней свободы в месте крепления упоров автосцепного устройства и пятников.

В результате расчетов получены значения напряжений в металлоконструкции кузова платформы для двух случаев приложения нагрузок, соответствующих разным вариантам продольного крепления труб. Схемы распределения эквивалентных по Мизесу напряжений представлены на рисунках 4 и 5.

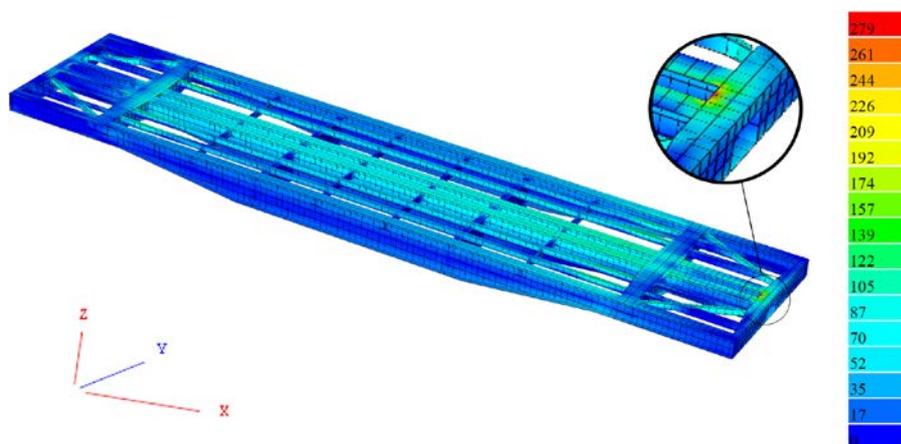


Рис. 4 – Эквивалентные по Мизесу напряжения в раме вагон-платформы, МПа, при креплении труб всех ярусов непосредственно к раме платформы

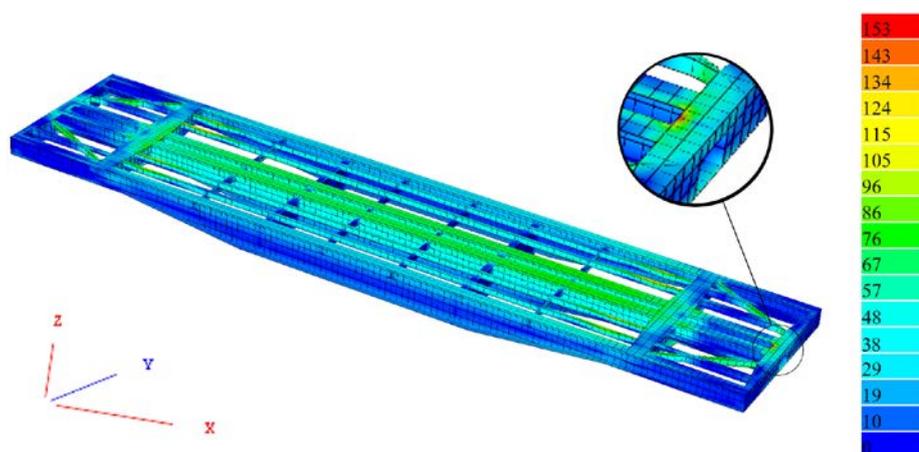


Рис. 5 – Эквивалентные по Мизесу напряжения в раме вагон-платформы, МПа, при поярусном креплении труб

В таблице 2 приведены максимальные значения полученных напряжений по основным конструктивным группам элементов вагона-платформы. Из нее видно, что напряжения в хребтовой, шкворневой и боковой балках рамы в обоих случаях не превышают допустимые значения. В то же время при креплении всех ярусов труб непосредственно к

металлоконструкции вагона-платформы расчетные значения в концевой балке превышают допустимые на 14 %. При поярусном креплении труб расчетные напряжения в этой балке снижаются почти в два раза.

Табл. 2 – Значения максимальных напряжений для двух схем крепления труб на вагон-платформе

Наименование конструктивной группы	Расчетные напряжения, МПа		Допускаемые напряжения, МПа
	Схема а	Схема б	
Хребтовая балка	105	86	245
Шкворневая балка	35	29	245
Концевая балка	279	153	245
Боковая балка	87	48	245

### Выводы

Результаты выполненного исследования показывают, что при разработке креплений тяжеловесных и длинномерных грузов на железнодорожном подвижном составе требуется не только выполнять расчет креплений, но и осуществлять проверку прочности металлоконструкции вагона под действием ударных нагрузок. В рассмотренном случае оказалось, что схема с непосредственным креплением труб к металлоконструкции вагона-платформы не может быть рекомендована к использованию, так как возникающие напряжения превышают допустимые значения. Таким образом, для транспортировки пяти труб большого диаметра на вагоне-

платформе целесообразно использовать поярусное крепление труб.

### Литература

1. Технические условия размещения и крепления грузов. Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС). – Минск: Амалфея, 2015. – 704 с.
2. AAR Open Top Loading Rules Manual. Section 2. Rules for Loading Metal Products, Including Pipe. – Washington: Association of American Railroads, 2020. – 440 p.
3. Loading Guidelines. Code of practice for the loading and securing of goods on railway wagons. Volume 1. Principles. – Paris: International Union of Railways (UIC), 2020. – 133 p.

4. An innovative method for calculating diagonal lashing force of cargo on railway wagons in a curve alignment / D. Zhang [et al] // *Vehicle System Dynamics*. – 2021. – Vol. 59, No. 31. – pp. 352–374.

5. Упырь Р.Ю. Возникновение и оценка динамического взаимодействия груза и вагона / Р.Ю. Упырь, Н.В. Давыдова, Ц. Хурэлбаатар // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2018. – № 1 (57). – С. 8–15.

6. Туранов Х.Т. Математическое моделирование движения груза вдоль вагона при воздействии плоской системы сил / Х.Т. Туранов, Е. Д. Псеровская // *Транспорт Урала*. – 2013. – № 4. – С. 11–18.

7. Turanov K. On the shift of cargo on a railway platform under the influence of transverse forces / K. Turanov, Y. Ruzmetov // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 157. – Article 01012. – 12 p.

8. Егоров С.А. Совершенствование методики расчета элементов крепления в статически неопределимых схемах закрепления единичного груза / С.А. Егоров, Л.А. Гребенюк, С.Ю. Хорунжин // *Известия Транссиба*. – 2011. – № 4 (8). – С. 87–94.

9. Olentsevich V. A. Computational procedure for preparing the technical conditions for stowage and securing cargo in rail cars and containers / V.A. Olentsevich, R.Yu. Upyr', A. M. Gladkih // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1615. – Article 012029. – 10 p.

10. 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. – pp. 218–222.

11. Попова О.В. Разработка методики анализа нагруженности несущих конструкций грузовых вагонов для перевозки длинномерных грузов / О.В. Попова, Ю.А. Чиграй // XXII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС–2010) «Будущее машиностроения России»: избранные труды. / М. : ИМАШ РАН, 2011. – С. 114–120.

12. Фомин А.В. Научно-практическое исследование прочности рамы длиннобазной платформы / А.В. Фомин, Д.В. Федосов-

Никонов // *Вестник науки и образования*. – 2018. – № 10 (46). – С. 8–15.

13. Путято А.В. Расчет на прочность кузова вагона-платформы для перевозки лесных грузов при ударе / А.В. Путято, А.В. Пигунов, В.В. Белогуб // *Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки*. – 2008. – Вып. 2. – С. 53–58.

14. Сенько В.И. Перепрофилирование вагона бункерного типа в вагон-платформу для перевозки лесных грузов / В.И. Сенько, А.В. Путято // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщений*. – 2011. – № 2. – С. 50–54.

15. Петренко В.О. Дослідження можливостей відновлення хребтової балки вантажних вагонів в районі шворневого вузла на основі вагона-зерновоза моделі 19-752 / В.О. Петренко, Д.І. Буліч // *Залізничний транспорт України*. – 2018. – № 4. – С. 27–36.

16. Визначення показників міцності несучої конструкції кузова критого вагону з круглих труб при перевезенні на залізничному поромі / О.В. Фомін [и др.] // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2019. – Т. 1, № 7 (97). – С. 33–40.

17. Устройство для крепления стальных труб с подготовленными под сварку торцовыми кромками на раме железнодорожного транспортного средства: пат. 23277 Беларусь, МПК (2006): В 60Р 7/00 / И.А. Ворожун; заявитель Белорусский государственный университет транспорта – № а 20190102; заявл. 08.04.2019; опубл. 30.12.2020.

18. 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.

19. Псеровская Е.Д. Изучение динамики многоярусного груза и воспринимаемых креплением нагрузок при маневровых соударениях вагонов / Е.Д. Псеровская, С.Ю. Хорунжин // *Известия Транссиба*. – 2010. – № 1 (1). – С. 106–112.

20. Ворожун И. А. Анализ корректности математических моделей соударения вагонов-платформ при упругом способе крепления на них ярусов труб / И.А. Ворожун // *Механика. Исследования и инновации*. – 2018. – Вып. 13. – С. 40–46.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Путято Артур Владимирович**,  
д.т.н., доцент, ректор Гомельского  
государственного технического университета  
имени П.О. Сухого.  
Просп. Октября, 48, г. Гомель, 246746,  
Беларусь.  
Тел.: +37 523 222 46 36.  
E-mail: putsyata.artur@gmail.com.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1828-8052>.

**Шимановский Александр Олегович**,  
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой

«Техническая физика и теоретическая меха-  
ника» Белорусского государственного универ-  
ситета транспорта (БелГУТ).  
Ул. Кирова 34, г. Гомель, 245053, Беларусь.  
Тел.: +37 529 831 14 29.  
E-mail: tm.belsut@gmail.com.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8550-1725>.

**Ворожун Ирина Александровна**,  
старший преподаватель кафедры «Техниче-  
ская физика и теоретическая механика»  
БелГУТ.  
Ул. Кирова 34, г. Гомель, 245053, Беларусь.  
Тел.: +37 529 732 65 05.  
E-mail: ivorozhun@yandex.by.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6118-1042>.

## Моделі та моделювання

УДК 629.456  
DOI: 10.34029/2311-4061-2021-139-2-24-30

*Інженери Радкевич М. М., Петренко В. О.,  
Прокопенко П. М., Кошель О. О.,  
Канд. техн. наук Кара С. В.*

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ  
РАМ ВІЗКІВ СПЕЦІАЛЬНОГО РУХОМОГО  
СКЛАДУ НА БАЗІ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

*Ключові слова: пасажирський вагон, не-  
сучі металеві конструкції, візок, рама візка,  
міцність, опір втоми.*

## Вступ та постановка проблеми

Основна кількість металевих несучих  
конструкцій вагонів спеціального рухомого  
складу залізниць України на сьогоднішній  
день знаходяться в критичному стані - в да-  
ний час терміни експлуатації значної кілько-  
сті візків спеціального рухомого складу колії  
1520 мм в Україні перевищує встановлений  
заводом виробником термін служби цього  
вузла, у більшості випадків значно від грани-  
чного. Багато в чому це пов'язано як з істот-  
ним запасом міцності, який був закладений  
при проектуванні у несучі металеві констру-  
кції візків, так і з особливостями експлуатації  
конкретного типу вагонів.

Забезпечити безпечно і своєчасне переве-  
зання пасажирів і вантажів - одна з головних  
задач залізничного транспорту. У зв'язку з  
цим, став проявлятися дефіцит візків паса-  
жирських вагонів, оскільки їх терміни ек-  
сплуатації практично вичерпали свій плано-  
вий ресурс, а в деяких випадках значно пере-  
вищили його.

Дефіцит візків вагонів спеціального рухо-  
мого складу теж має місце через досягненням  
ними нормативного терміну служби та заку-  
півлею в недостатній кількості нових візків  
для їх заміни. Враховуючи зменшене заван-  
таження експлуатаційною роботою спеціа-  
льного рухомого складу на базі пасажирсь-  
ких вагонів, у порівнянні з поїзними паса-  
жирськими вагонами, зі строком служби їх  
візків КВЗ-ЦНИИ (типи – I, II, M) понад 41  
рік є доцільність у проведенні робіт щодо  
визначення залишкового ресурсу несучих  
рам цих візків та продовження строку їх  
служби. Вирішення цієї задачі дасть змогу  
продовжити строк експлуатації технічно  
справних несучих рам візків вагонів спеціа-  
льного рухомого складу, без надлишкових  
витрат на їх повне оновлення [1].

## Мета статті

Дослідження залишкового ресурсу рам ві-  
зків типу КВЗ-ЦНИИ спеціального рухомого  
складу на базі пасажирських вагонів, що зна-  
ходяться у експлуатації понад 41 рік, з метою  
визначення можливості та строків їх подаль-  
шої експлуатації.