

***І. Е. Мартинов***

Український державний університет залізничного транспорту  
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна  
Тел.: +380577301035, E-mail: martinov.hiit@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>

***А. В. Труфанова***

Український державний університет залізничного транспорту  
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна  
Тел.: +380577301035, E-mail: trufanova@kart.edu.ua  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>

***В. О. Шовкун***

Український державний університет залізничного транспорту  
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна  
Тел.: +380577301035, E-mail: vadimshovkun62@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>

***М. В. Дмитренко***

Український державний університет залізничного транспорту  
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна  
Тел.: +380577301035, E-mail: lemtr21@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2712-2495>

### **АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КРИШОК РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ ЛЮКІВ НАПІВВАГОНІВ ПРИ СКИДАННІ ВАНТАЖУ**

*В статті наведено результати аналізу відмов та пошкоджень основних вузлів універсальних напіввагонів різних моделей та виробників власності АТ «Укрзалізниця». Визначено, що понад 70 % відчеплень напіввагонів на шляху прямування викликано пошкодженням кузовів.*

*Проведено аналіз причин пошкоджень суцільнометалевих кузовів, що призводять до необхідності позапланового відновлення їх працездатності. Встановлено, що понад 80 % усіх випадків припадає на несправності кришок люків, а також тріщини й злами поперечних балок рами. Різниця в кількості відчеплень у різних моделей напіввагонів українського виробництва знаходиться в межах статистичної похибки. Основний вплив на виникнення тріщин балок та пошкодження люків мають не конструктивні особливості конкретної моделі напіввагона, а способи розвантаження (використання грейферів тощо).*

*Досвід експлуатації свідчить, що при скиданні вантажу з висоти, відбувається нерівномірний розподіл ударних навантажень на поверхню люків.*

© *Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Шовкун В. О., Дмитренко М. В., 2026.*

*Особливо небезпечним є падіння окремих крупногабаритних кусків (глиб) вантажу, яке супроводжується локальними перевантаженнями, що значно перевищують розрахункові статичні значення. У результаті цього виникають пластичні деформації, вм'ятини, тріщини в зоні зварних з'єднань, а також передчасне руйнування елементів конструкції люка.*

*З метою дослідження напружено-деформованого стану конструкції люка напіввагона при дії ударного навантаження у роботі використано чисельне моделювання. Геометрична модель кузова універсального напіввагона та вантажу була розроблена в середовищі ANSYS. Для підвищення ефективності обчислювального процесу було застосовано підхід локалізації розрахункової області. Чисельне моделювання процесу ударної взаємодії глиби вантажу з конструкцією люка напіввагона виконувалось із використанням явної схеми інтегрування рівнянь руху.*

*За результатами чисельного моделювання процесу падіння глиби вантажу на люк напіввагона отримано розподілення напружень і деформацій для різних сценаріїв навантаження, які відрізняються висотою падіння та зоною прикладання удару.*

*Аналіз напружено-деформованого стану показав, що характер розподілу еквівалентних напружень є суттєво неоднорідним і залежить як від геометрії конструкції, так і від місця прикладання ударного навантаження. Максимальні напруження локалізуються в зоні контакту глиби вантажу з поверхнею люка та в елементах, що забезпечують передавання навантаження до рами вагона.*

*Ключові слова: універсальний напіввагон, кузов, кришка люка, поперечна балка, тріщина, злам.*

**Вступ.** Українські залізниці мають стратегічне значення як для економіки, так і обороноздатності країни. Завдяки розвинутій мережі залізничний транспорт залишається логістичною основою шляхів сполучення країни, особливо для важкої промисловості.

Саме залізничний транспорт є ідеальним засобом транспортування перевезення важких та великогабаритних вантажів, таких як вугілля, руда, нафтопродукти та будівельні матеріали. У порівнянні з автомобільним транспортом один вантажний потяг може замінити десятки важких автомобільних фур, що значно знижує вартість перевезення тони вантажу (особливо на великі відстані).

На відміну від автотранспорту чи авіації, залізниця практично не залежить від погодних умов, що забезпечує стабільність поставок. Саме тому перевезення продукції металургійної та машинобудівної галузей в основному здійснюється саме залізницями. Це стосується і військових перевезень. Існує також екологічний аспект: використання електровозів для тяги поїздів робить цей вид транспорту більш екологічним та економічно привабливим у порівнянні з дизельним автотранспортом.

Парк вантажних вагонів АТ «Укрзалізниця» (далі – УЗ) складається з великого різноманіття типів та моделей вагонів. Його основу складають так звані універсальні вагони: криті, напіввагони, платформи та цистерни для нафтопродуктів. Останніми роками більш широко розповсюдження дістали спеціалізовані вагони: хопери для перевезення сипких вантажів (зерно, цементу тощо), платформи для перевезення контейнерів, спеціалізовані цистерни (для харчових продуктів, хімічних речовин тощо) та ін.

Особлива роль в системі перевезень масових вантажів належить універсальним напіввагонам (НПВ). Вони складають половину робочого парку вагонів УЗ, здійснюють масові перевезення вугілля, щебню, лісоматеріалів, будівельних матеріалів та інших вантажів, що не потребують захисту від атмосферних опадів. Як правило, НПВ експлуатуються максимально інтенсивно та стикаються з екстремальними навантаженнями (особливо під час завантаження та вивантаження).

Також НПВ дуже часто пошкоджуються під час проведення вантажно-розвантажувальних робіт. Грейферні навантажувачі своїми ударами масивними ковшами по стінках та обв'язці вагона призводять до деформації обшивки. Якщо геометрія елементів кузова (особливо верхня обв'язка) при попередній експлуатації змінена у порівнянні з вихідними геометричними розмірами, при розвантаженні на вагоноперекидачах пристрою виникають перекоси кузова.

Взимку вугілля або щебінь можуть примерзати до стінок НПВ. Використання «кирок», відбійних молотків або нерегламентований розігрів вогнем руйнує захисне покриття та прискорює корозію. Відповідно, це вимагає додаткових витрат на відновлення працездатності вагонів.

При завантаженні особливо небезпечним є падіння окремих крупногабаритних кусків (глиб) вантажу, яке супроводжується локальними перевантаженнями, що значно перевищують розрахункові статичні значення.

**Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми.** Питанням забезпечення міцності та надійності універсальних НПВ присвячена значна кількість наукових досліджень як в Україні, так і за її межами. Фахівцями ДП «Український науково-дослідний інститут вагонобудування» у статтях [1, 2] виконано аналіз динаміки перевезення вантажів та визначені найбільш актуальні на даний час типи вагонів. Запропонована процедура вибору раціональної моделі розвитку вітчизняного парку вантажних вагонів з використанням методу експертного оцінювання.

Аналіз досвіду експлуатації НПВ на залізницях Казахстану наведено у статті [3]. Умови експлуатації в цій країні подібні до українських: великі плечі перевезень, суворий клімат та інтенсивне використання масових вантажів. Автори приходять до висновку, що найчастіше пошкоджуються саме кришки розвантажувальних люків. Особливо небезпечним є період ближче до планового ремонту: запас міцності добігає кінця та ймовірність позапланового відчеплення зростає в рази. Це змушує власника проводити позаплановий поточний ремонт (ПТР), що значно дорожче за рахунок логістики до найближчого ремонтного пункту.

У статті [4] викладені основні результати аналізу відмов та пошкоджень кузовів універсальних НПВ, які викликали відчеплення вагону від поїзду для відновлення працездатності. Автори стверджують, що найчастіше в експлуатації виникають несправності заборів кришок розвантажувальних люків, тріщини та злами верхніх і вертикальних листів поперечних балок рами. Це може призвести не лише до втрат вантажу, а й створити загрозу безпеці руху.

Ці ж питання розглядаються у дослідженні [5]. Наведений аналіз результатів експлуатації НПВ свідчить, що після 7–8 років експлуатації кожен НПВ для відновлення працездатності 7–10 разів на рік надходить в поточний ремонт. Серед причин автори виділяють інтенсивний корозійний знос, викликаний агресивним впливом вантажу, що перевозиться, в умовах несприятливого зовнішнього середовища.

Увага дослідників також була спрямована на впровадження для виготовлення кузовів нових конструкційних матеріалів. Так, використання алюмінію замість традиційної сталі в конструкції кузова суттєво зменшує масу тари НПВ, дозволяє збі-

льшити їх вантажопідйомність, продовжити термін служби до 30 років завдяки збільшеній корозійній стійкості [6]. Це підтверджують автори статті [7], де розглянуті конструктивні особливості кузовів деяких моделей сучасних НПВ. Менша маса тари вагону знижує витрати енергоресурсів локомотивами на тягу. У дослідженні [8] стверджується, що кузов вагона, виконаний із застосуванням алюмінієво-магнієвих сплавів дозволить зменшити масу тари на 2 %. Ці сплави дозволяють створювати міцні конструкції без втрати властивостей у зоні зварного шва. При значно меншій густині у порівнянні зі сталлю, вони дозволяють витримувати значні навантаження. Але висока вартість виготовлення алюмінію та його непридатність для традиційних методів зварювання обмежує його застосування у вагонобудуванні.

Авторами досліджень [9, 10] виконано аналіз міцності підлоги НПВ за допомогою методу скінчених елементів. На підставі проведених розрахунків запропоновано конструкцію підлоги кузова НПВ з поліпшеною геометрією. Це дозволяє зменшити еквівалентні напруження до 10 % та суттєво збільшити коефіцієнт запасу міцності у порівнянні з традиційними конструкціями.

У статті [11] розглянуті результати досліджень модернізованих кришок люків НПВ з реалізацією попереднього напруження та полотна з привареними кутниками.

Результати аналізу причин виникнення несправностей НПВ висвітлені у статті [12]. Авторами досліджена міцність несучих конструкцій кузовів та запропоновані конструктивні рішення щодо підсилення найбільш навантажених елементів кузова НПВ: перетворення бічних стінок на основні несучі ферми та використання замкнених профілів для підвищення жорсткості на кручення. Локальне зміцнення зон над візками забезпечують довговічність конструкції при збереженні низького рівня підлоги.

Значна частина досліджень присвячена попередженню пошкоджень кузовів НПВ при рейковому розвантаженні та розвантаженні на перекидачах вагонів. Автори статті [13] аналізують характерні пошкодження кузовів універсальних НПВ після рейкового розвантаження. Це обриви проміжних стояків бокової стіни у місцях опирання на проміжні поперечні балки рами, пошкодження обв'язки та обшиви кришок розвантажувальних люків, пошкодження верхньої обв'язки бокових та торцевих стін. Запропоновано заходи щодо посилення і модернізації зазначених елементів.

У статті [14] стверджується, що процес розвантаження змерзлих вантажів у вагоперекидачах створює критичні навантаження на кузов. Коли вантаж примерзає до бокових стін НПВ, зусилля, що виникають при його відриві або при роботі вібраційних пристроїв, можуть перевищувати розрахункову міцність елементів НПВ. В контексті збереження міцності кузова авторами виконано огляд технічних рішень для руйнування змерзлого вантажу. Це механічне розпушування, теплове відновлення сипкості та такі специфічні методи, як використання хімічних та профілактичних засобів для запобігання змерзанню ще на етапі завантаження.

У статтях [15, 16], автори зосереджують увагу на динаміці роботи роторного вагоперекидача як основного джерела навантажень на кузов. Аналітичне визначення інерційних складових дозволяє точно оцінити, що саме відбувається з конструкцією НПВ у момент повороту ротора.

Практика експлуатації свідчить, що при механізованому завантаженні, зокрема при скиданні вантажу з висоти, відбувається нерівномірний розподіл ударних навантажень на поверхню люків. Особливо небезпечним є падіння окремих крупногабаритних кусків (глиб) вантажу, яке супроводжується локальними перевантажен-

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

нями, що значно перевищують розрахункові статичні значення. У результаті цього виникають пластичні деформації, вм'ятини, тріщини в зоні зварних з'єднань, а також передчасне руйнування елементів конструкції люка. Очевидно, що питання оцінювання локальних ударних впливів від падіння окремих кусків вантажу залишається недостатньо дослідженим.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є аналіз розподілення основних пошкоджень кузовів НПВ, розгляд процесу завантаження сипких та кускових вантажів та взаємодії глиби вантажу з конструкцією люка напіввагона, розрахунок оцінка напружено-деформованого стану елементів кришок люків з урахуванням реальних умов експлуатації.

**Матеріали та методи дослідження.** В рамках даного дослідження на першому етапі був проведений аналіз відмов та пошкоджень основних вузлів універсальних НПВ власності АТ «Укрзалізниця». Особлива увага була приділена пошкодженням кузовів. Вихідними даними були форми ВУ-23 за 2022-2024 р.

Парк універсальних НПВ складається з великого різноманіття моделей. Переважну більшість складають НПВ моделей 12-9745 виробництва вагоноремонтних заводів України, НПВ моделей 12-783, 12-757, 12-7023 виробництва АТ «Крюківський вагонобудівний завод», 12-4106 виробництва ПАТ «Дніпровагонмаш» та НПВ ще деяких українських виробників. Також експлуатується ряд моделей НПВ, виготовлених російськими та білоруськими вагонобудівними підприємствами. Очевидно, що у 2022 році вони залишились на території України. Необхідно зазначити, що їх кількість незначна, тому в подальших розрахунках вони не враховувались.

У таблиці 1 наведено розподіл основних причин відчеплення універсальних НПВ на шляху прямування. Найбільша частка відмов припадає на масові моделі, що зумовлено як інтенсивністю їх експлуатації, так і значним терміном служби.

*Таблиця 1. – Розподіл основних причин відчеплення універсальних НПВ на шляху прямування*

Конструктивні елементи вагона	Причини відчеплення по моделям НПВ у %				
	12-9745	12-757	12-783	12-7023	12-4106
Колісні пари	1,67	0,70	2,74	1,13	3,34
Буксові вузли	0,15	0,00	0,18	0,25	-
Візки	3,04	2,51	2,28	1,47	1,81
Автозчепи	1,46	2,11	1,12	0,39	0,97
Автогальма	5,91	3,51	6,33	3,52	7,38
Кузов	77,14	84,34	74,67	83,01	70,66
Інше	10,62	6,83	12,69	10,21	15,81

Аналіз даних, поданих у таблиці 1, свідчить, що саме відмови кузовів викликають переважну більшість відчеплень НПВ на шляху прямування (понад 70 %). Залежність від моделі НПВ практично відсутня.

У таблиці 2 наведено розподіл основних причин пошкоджень кузовів універсальних НПВ.

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 2. – Розподіл основних причин пошкоджень кузовів універсальних НПВ

Конструктивні елементи кузова	Причини відчеплення по моделям НПВ у %				
	12-9745	12-757	12-783	12-7023	12-4106
Обрив зварного шва стійки	1,87	2,05	2,43	2,00	2,87
Несправності кришок люків	61,95	58,84	59,25	46,90	67,42
Пошкодження обшивки кузова	2,09	0,12	0,46	0,12	0,75
Тріщини та злами поперечної балки рами	31,57	37,18	33,92	48,67	26,34
Тріщина у вузлах сполучення хребтової та шкворневої балок	0,49	0,12	0,27	0,06	0,12
Обрив по зварюванню, розрив накладок	1,4	1,32	2,8	1,85	0,62
Інше	0,63	0,36	0,87	0,12	1,87

Аналіз наведених даних свідчить про те, що різниця кількості відчеплень через пошкодження кузовних елементів у різних моделей напіввагонів українського виробництва знаходиться в межах статистичної похибки. Тобто основний вплив на виникнення тріщин балок та пошкодження люків мають не конструктивні особливості конкретної моделі, а способи розвантаження (використання грейферів, вібророзвантажувачів) та динамічні удари кускових вантажів о підлогу НПВ під час скидання з висоти.

Відповідно до вимог [17] при розрахунках елементів конструкції вагонів на міцність необхідно враховувати сукупність навантажень, що відповідають різним розрахунковим режимам експлуатації.

У практиці інженерних розрахунків оцінювання ударних навантажень, що діють на люки НПВ при падінні глиби вантажу, здійснюється із застосуванням декількох підходів, які відрізняються рівнем деталізації та точності отриманих результатів.

Найбільш поширеним є інженерний метод, що базується на використанні коефіцієнта динамічності. У межах цього підходу ударне навантаження враховується шляхом множення статичного навантаження на узагальнений коефіцієнт, який враховує динамічний характер взаємодії вантажу з конструкцією. Такий підхід відзначається простотою реалізації та можливістю швидкої оцінки рівня навантаженості елементів, однак має суттєві обмеження.

Альтернативою є чисельні методи дослідження, що реалізуються з використанням сучасних програмних комплексів інженерного аналізу. Разом з тим, чисельні методи потребують значних обчислювальних ресурсів, коректного задання граничних умов, параметрів контакту та моделей матеріалів, що ускладнює їх застосування на етапі попередніх інженерних оцінок.

Попередньо геометрична модель кузова вагона моделі 12-9911 та вантажу була розроблена в середовищі ANSYS Discovery (рис. 1).

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

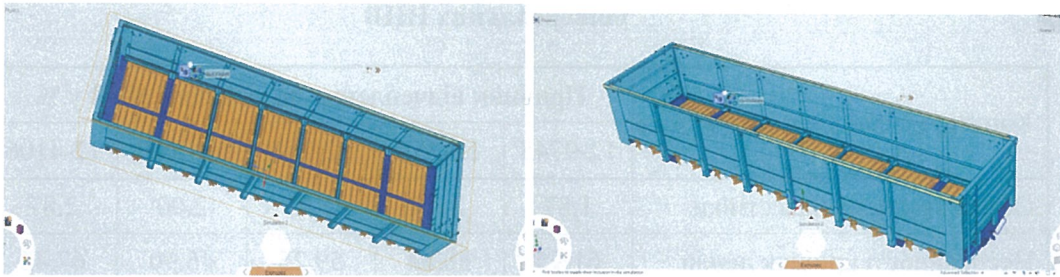


Рис. 1. Геометрична модель кузова напіввагона

Але повномасштабне моделювання всієї конструкції кузова вагона вимагає використання дрібної скінчено-елементної сітки та малих кроків інтегрування для забезпечення стійкості розрахунку. Це потребує значних обчислювальних витрат. Тому для підвищення ефективності обчислювального процесу було застосовано підхід локалізації розрахункової області.

При ударі глиби вантажу основні напруження та деформації мають локальний характер і концентруються в зоні контакту та в елементах, що забезпечують передавання навантаження від люка до елементів несучої конструкції кузова. Тому для вирішення даної задачі доцільно виділити з повної моделі лише найбільш навантажену ділянку, яка безпосередньо бере участь у процесі ударної взаємодії, а саме: конструкції люка, елементів його кріплення та прилеглої частини рами вагона (рис. 2).

При цьому вплив віддалених елементів конструкції кузова враховується опосередковано шляхом задання відповідних граничних умов на межах виділеної області, що імітують жорсткість та інерційні властивості решти конструкції.

На рис. 3 наведено розрахункову схему ударної взаємодії глиби вантажу з конструкцією люка напіввагона.

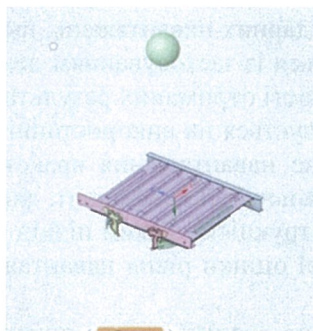


Рис. 2. Модель розвантажувального люка з вантажем

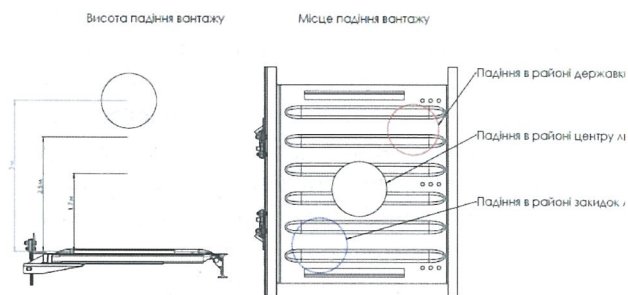


Рис. 3. Схема моделювання падіння глиби вантажу на люк напіввагона

У розробленій моделі передбачено варіювання висоти падіння вантажу в межах 1,7–3,0 м, та маси вантажу в межах 170–370 кг, що відповідає реальним умовам ви-

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

конання вантажно-розвантажувальних робіт. Для аналізу впливу місця прикладання ударного навантаження необхідно розглядати декілька характерних зон падіння глиби вантажу: центральна частина кришки люка, зона розташування державок та зона закидок люка. Зазначені області відрізняються конструктивною жорсткістю та умовами закріплення, що обумовлює різний характер напружено-деформованого стану при ударі. Центральна частина люка характеризується відносно меншою жорсткістю та більшою схильністю до локальних прогинів, тоді як у зонах державок та закидок спостерігається підвищена жорсткість, що призводить до зростання локальних напружень. В даній статті розглянуто результати дослідження міцності при падінні глиби на середню частину люка.

Глиба вантажу в моделі представлена у вигляді твердого тіла сферичної форми, що дозволяє спростити контактну взаємодію та забезпечити стабільність чисельного розрахунку при використанні явної динаміки.

Просторове представлення моделі дає можливість врахувати геометричні особливості конструкції люка та визначити найбільш небезпечні сценарії навантаження.

У подальшому геометрична модель була перетворена на скінчено-елементну шляхом дискретизації з використанням просторових твердотільних елементів (рис. 4).

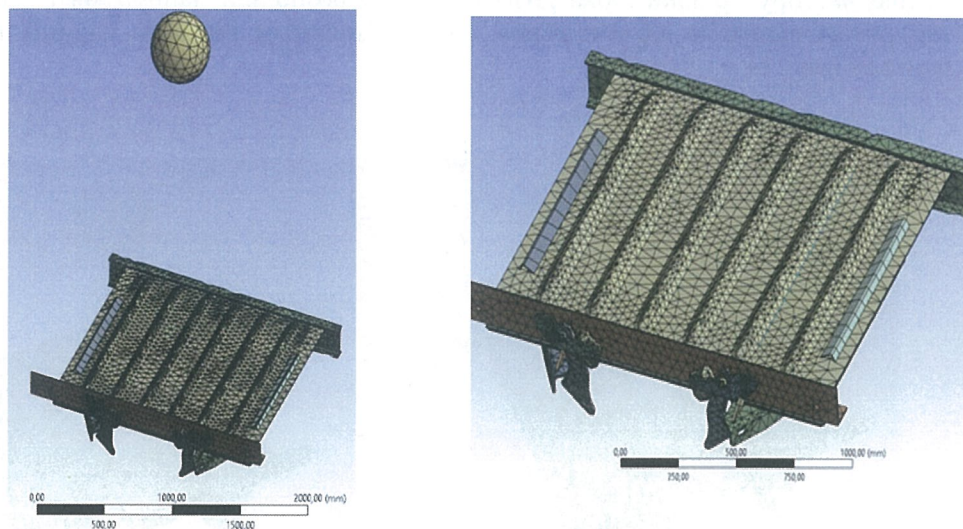


Рис. 4. Побудова сітки скінчених елементів

Для моделювання елементів конструкції люка та прилеглої частини рами застосовано елементи типу SOLID164, які використовуються в задачах явної динаміки та дозволяють враховувати великі переміщення, пластичні деформації та нелінійні контактні взаємодії.

Побудова розрахункової сітки виконувалась із урахуванням геометричних особливостей конструкції та зон можливих концентрацій напружень. З метою підвищення точності розрахунків у зоні передбачуваного контакту глиби вантажу з поверхнею люка було застосовано локальне згущення сітки. У менш навантажених

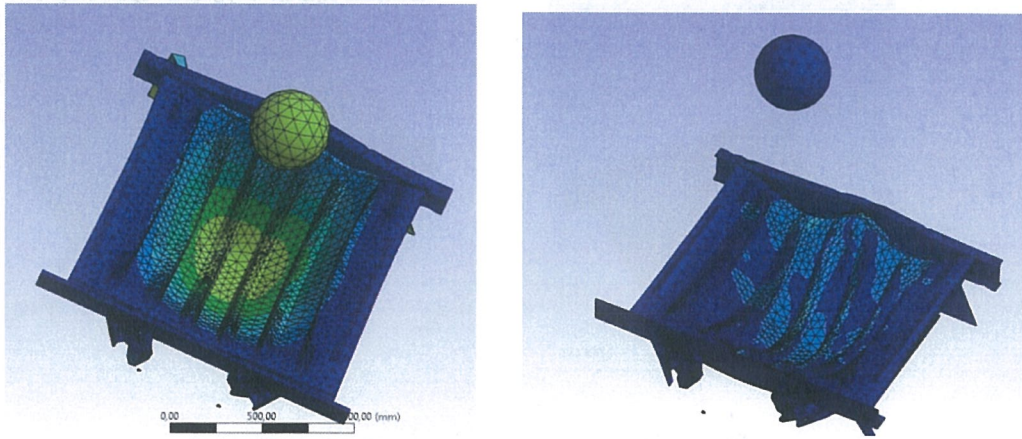
ділянках використовувалась укрупнена сітка, що забезпечило зниження обчислювальних витрат без суттєвої втрати точності результатів.

Вибір розміру скінченних елементів у зоні контакту здійснювався із застосуванням графоаналітичного методу. Отриманий таким чином раціональний розмір скінченних елементів було прийнято для формування остаточної розрахункової сітки в зоні ударної взаємодії. Це дозволило забезпечити компроміс між точністю результатів та обчислювальною ефективністю моделі.

Якість скінчено-елементної сітки контролювалась за показниками форми елементів (співвідношення сторін, кутові викривлення тощо), що забезпечило коректність чисельного розв'язку та його стійкість при моделюванні швидкоплинних динамічних процесів.

Чисельне моделювання процесу ударної взаємодії глиби вантажу з конструкцією люка напіввагона виконувалось із використанням явної схеми інтегрування рівнянь руху в середовищі ANSYS Explicit Dynamics. Застосування даного підходу обумовлено можливістю коректного відтворення швидкоплинних нелінійних процесів, що супроводжуються великими переміщеннями, пластичними деформаціями та складною контактною взаємодією. Контроль коректності розрахунку здійснювався на основі аналізу енергетичного балансу системи.

За результатами чисельного моделювання процесу падіння глиби вантажу на середню частину кришки люка НПВ отримано розподіли напружень і деформацій для різних сценаріїв навантаження, що відрізняються висотою падіння та масою вантажу (рис. 5).



*Рис. 5. Розподіл напружено-деформованого стану та деформацій*

Аналіз напружено-деформованого стану показав, що характер розподілу еквівалентних напружень є суттєво неоднорідним. Максимальні напруження локалізуються в зоні контакту глиби вантажу з поверхнею люка та в елементах, що забезпечують передавання навантаження до рами вагона.

Найбільш несприятливими є випадки падіння глиби вантажу в зонах підвищеної жорсткості конструкції, зокрема в районі державок та закидок люка. У цих зонах відбувається обмеження деформацій, що призводить до зростання локальних

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

напружень і формування концентрацій.

Зі збільшенням висоти падіння глиби та маси вантажу спостерігається зростання як максимальних напружень, так і величин переміщень конструкції (рис. 6, 7). Залежність носить нелінійний характер, що обумовлено пластичним деформуванням матеріалу та зміною умов контактної взаємодії в процесі удару.

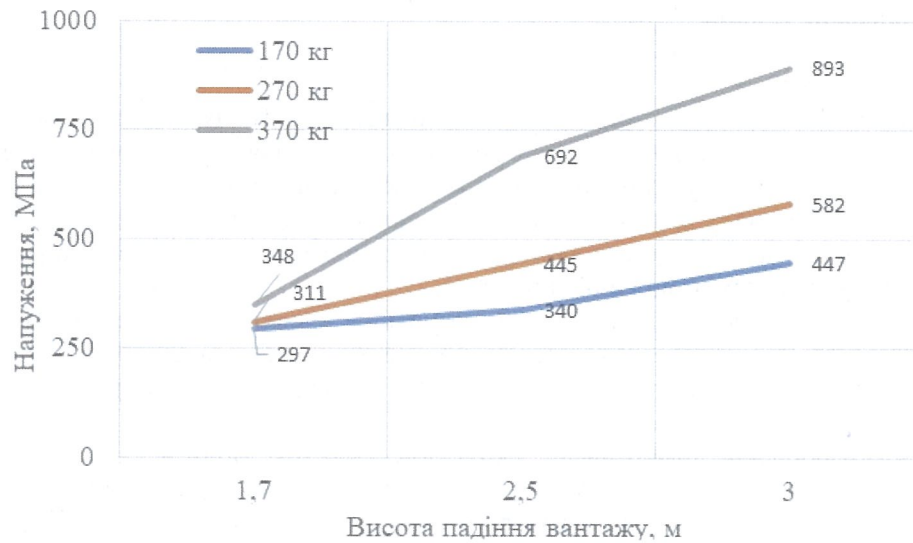


Рис. 6. Залежності зміни максимальних напружень при падінні вантажу в центрі розвантажувального люка

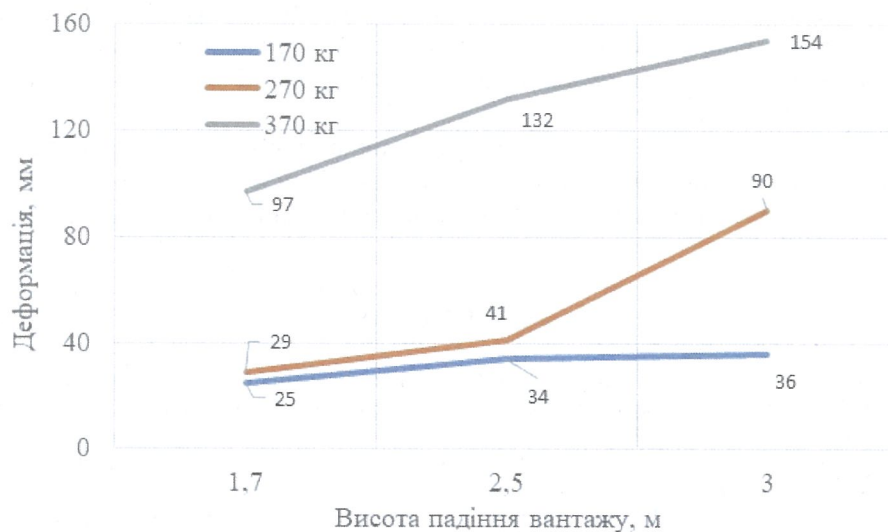


Рис. 7. Залежності зміни максимальних деформацій при падінні вантажу в центрі розвантажувального люка

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

---

При висотах падіння понад 2,5–3,0 м у ряді зон фіксується досягнення перевищення межі текучості матеріалу, що свідчить про можливість виникнення залишкових деформацій і пошкоджень конструкції люка в реальних умовах експлуатації.

Максимальні переміщення спостерігаються в центральній частині люка при відповідному сценарії навантаження, що пов'язано з меншою жорсткістю цієї ділянки. У той же час у зонах державок і закидок величини переміщень є меншими, проте саме тут формуються найбільш небезпечні напруження, що можуть призводити до зародження тріщин.

### Висновки:

1 Виконано аналіз основних пошкоджень НПВ на шляху прямування та доведено, що саме відмови кузовів викликають переважну більшість відчеплень.

2 Проаналізовано особливості навантаження люків універсальних напіввагонів при падінні глиби вантажу та встановлено, що ударна взаємодія має локальний характер і супроводжується формуванням значних концентрацій напружень у зоні контакту та в елементах кріплення люка.

3 Обґрунтовано доцільність застосування чисельного моделювання в явній динамічній постановці для дослідження процесу ударної взаємодії, що дозволяє врахувати нелінійні ефекти, контактні явища та пластичне деформування матеріалу.

4 Розроблено локалізовану скінчено-елементну модель, яка включає люк, елементи його кріплення та частину рами вагона, при цьому вплив решти конструкції враховано шляхом задання еквівалентних граничних умов.

5 Визначено вплив висоти падіння глиби вантажу у центрі розвантажувального люка на рівень напружень і деформацій. Показано, що зі збільшенням висоти падіння спостерігається нелінійне зростання напружень, а при певних значеннях досягається межа текучості матеріалу, що свідчить про можливість виникнення залишкових деформацій та пошкоджень.

6 Встановлено, що найбільш небезпечними є зони жорсткого закріплення (державки, закидки), де формуються максимальні еквівалентні напруження, тоді як у центральній частині люка переважають значні прогини при відносно нижчих рівнях напружень.

7 Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення конструкції люків напіввагонів, зокрема шляхом підсилення критичних зон або оптимізації геометричних параметрів, що дозволить зменшити рівень пошкоджень при навантаженні.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гладких І. В., Сулим А. О., Лупітько Н. В. Основні дослідження динаміки оновлення та розвитку парку вантажних вагонів в Україні. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. Кременчук: Вид-во ДП «УкрНДІВ». 2020. Вип. 20. С. 4-13.

2. Сулим А. О., Сафронов О. М., Федосов-Никонов Д. В., Стринжа А. М. Сучасний стан та перспективи розвитку парку вантажних вагонів в Україні: оновлення або продовження призначеного строку служби. *Залізничний транспорт України*. 2021. № 4. С. 4-20. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZTU\\_2021\\_4\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZTU_2021_4_3)

3. Заріпов Р. Ю., Сулейменов А. Д., Карімова Ж. Р. Дослідження надійності цільнометалевих напіввагонів (переклад р. м.). *Наука і техніка Казахстану*. 2021. № 4. С. 119-127. DOI: <https://doi.org/10.48081/gqrv7549>

4. Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Шовкун В. О., Литовченко О. М., Дмитренко М. В.,

- Балашов О. О. Дослідження технічного стану універсальних напіввагонів. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2023. № 209. С. 66-75. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314256>
5. Федосов-Ніконов Д. В., Стринжа А. М., Шамшей Д. О., Полулях В. М., Федоров В. В., Шушмарченко В. О. Дослідження корозійних пошкоджень елементів вагонів під час технічного діагностування. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. 2019. № 3 (251). С. 181–184.
6. Zaripov R., Gavrilovs P. Research Opportunities to Improve Technical and Economic Performance of Freight Car through the Introduction of Lightweight Materials in their Construction. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. P. 22-29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.345>
7. Myamlin S. V., Kolesnykov S. R. Design review of gondola car. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*. 2014. № 6 (54). С. 136-145. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/33773>
8. Lee W. G., Kim J-S., Sun S-J., Lim J-Y. The next generation material for lightweight railway car body structures: magnesium alloys. *Proc Inst Mech Eng Part F J Rail Rapid Transit*. 2018. Vol. 232. Iss. 1. P. 25-42. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716646140>
9. Baranovskyi D., Myamlin S., Kebal I. Increasing the Carrying Capacity of the Solid-Body Rail Freight Car. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022. 16 (3), P. 219-225. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/149935>
10. Baranovskyi D., Bulakh M., Bulakh M. Determining the service life of a gondola car with an increased floor body safety factor. *Reliability Engineering & System Safety*. 2026. Vol. 266. Art. 111670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111670>
11. Фомін О. В., Горбунов М. І., Коваленко В. В., Флярковська В. О. Формалізовані описання конструкцій кришок люків напіввагонів (частина 2). *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. 2018. № 1 (242). С. 145-152
12. Antipin D. Ya., Racin D. Y., Shorokhov S. G. Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the Open-Top Wagon Frame by Means of Computer Simulation. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 150-154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.738>
13. Візник Р. І., Чепурченко І. В., Луценко А. О. Особливості визначення експлуатаційних навантажень кузова напіввагона та шляхи удосконалення його конструкції з метою забезпечення міцності і збереження. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. № 159. С. 91–97. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.159.2016.67018>
14. Минеев С. П., Прусова А. А., Выгодин М. А., Минеев А. С. Основные технологические решения по эффективной разгрузке смерзшегося груза из железнодорожных полувагонов. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. 2012. № 40. С. 124-130.
15. Візник Р. І. Визначення динамічних сил, що діють на піввагон при розвантаженні роторним вагоноперекидачем. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2023. № 203. С. 35-44. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.203.2023.277952>
16. Візник Р. І. Вивантаження з залізничних напіввагонів насипних вантажів удосконаленим способом перекидання. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2025. № 212. С. 208-216. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336410>
17. ДСТУ 7598:2014 Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Введено на підставі наказу ДП «УкрНДНЦ» від 02.12.2014 № 1430. Київ, ДП «УкрНДНЦ», 2014. 161 с.

### ***I. E. Martynov***

Ukrainian State University of Railway Transport  
7 Feuerbach Square, 61050, Kharkiv, Ukraine  
Tel.: +380577301035, E-mail: [martynov.hiit@gmail.com](mailto:martynov.hiit@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>

### ***A. V. Trufanova***

Ukrainian State University of Railway Transport  
7 Feuerbach Square, 61050, Kharkiv, Ukraine  
Tel.: +380577301035, E-mail: [trufanova@kart.edu.ua](mailto:trufanova@kart.edu.ua)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>

***V. O. Shovkun***

Ukrainian State University of Railway Transport  
7 Feuerbach Square, 61050, Kharkiv, Ukraine  
Tel.: +380577301035, E-mail: vadimshovkun62@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>

***M. V. Dmytrenko***

Ukrainian State University of Railway Transport  
7 Feuerbach Square, 61050, Kharkiv, Ukraine  
Tel.: +380577301035, E-mail: lemtr21@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2712-2495>

**ANALYSIS OF THE STRESS AND DEFORMATION STATE OF THE  
LIDS OF UNLOADING HATCHES OF GONDOLA CARS DURING  
CARGO UNLOADING**

*The article presents the results of the analysis of failures and damage to the main components of universal gondolas of various models and manufacturers owned by JSC Ukrzaliznytsia. It was determined that more than 70% of gondola decouplings on the route are caused by damage to the bodies.*

*An analysis of the causes of damage to all-metal bodies with subsequent unscheduled restoration of operability was performed. The vast majority are malfunctions of hatch covers, cracks and fractures of the frame crossbeams (more than 80% of the total number). The difference in the number of decouplings in different models of gondolas of Ukrainian production is within the statistical error. The main influence on the occurrence of beam cracks and damage to hatches is not the design features of a specific gondola model, but the methods of unloading (use of grabs, etc.). An analysis of the causes of damage to all-metal bodies with subsequent unscheduled restoration of operability was performed. The vast majority are malfunctions of hatch covers, cracks and fractures of the frame crossbeams (more than 80% of the total number). The difference in the number of decouplings in different models of gondolas of Ukrainian production is within the statistical error. The main influence on the occurrence of beam cracks and damage to hatches is not the design features of a specific gondola model, but the methods of unloading (use of grabs, etc.).*

*Operating experience shows that when dropping cargo from a height, there is an uneven distribution of shock loads on the surface of the hatches. The fall of individual large-sized pieces (lupm) of cargo is especially dangerous, which is accompanied by local overloads that significantly exceed the calculated static values. As a result, plastic deformations, dents, cracks in the area of welded joints, as well as premature destruction of hatch structural elements occur.*

*In order to study the stress-strain state of the gondola hatch structure under impact load, numerical modeling was used in the work. The geometric model of the universal gondola body and cargo was developed in the ANSYS environment. To improve computational efficiency, an approach based on localization of the calculation domain was applied. Numerical simulation of the impact interaction between a cargo lump and the*

*hatch structure was carried out using an explicit time integration scheme for the equations of motion.*

*According to the results of numerical modeling of the process of falling of the cargo lump onto the hatch of a gondola car, the distribution of stresses and strains was obtained for various loading scenarios, which differ in the height of the fall and the area of impact application.*

*Analysis of the stress-strain state showed that the nature of the distribution of equivalent stresses is significantly heterogeneous and depends both on the geometry of the structure and on the place of application of the impact load. The maximum stresses are localized in the area of contact of the cargo lump with the hatch surface and in the elements that ensure the transfer of the load to the car frame.*

*Keywords: universal gondola car, body, frame, hatch cover, cross beam, pillar, body skin, crack, fracture.*

### REFERENCES

1. Gladkikh, I. V., Sulym, A. O., & Lupitko, N. V. (2020) Osnovni doslidzhennya dynamiky onovlennya ta rozvytku parku vantazhnykh vahoniv v Ukraini [Basic research on the dynamics of renewal and development of the freight car fleet in Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats' «Reykovyy rukhomyy sklad» – Collection of scientific papers «Railbound rolling stock»*, Kremenchuk: Vyd-vo DP «UkrNDIV», 20, 4-13 [in Ukrainian].
2. Sulym, A. O., Safronov, O. M., Fedosov-Nykonov, D. V., & Strynzha, A. M. (2021) Suchasnyy stan ta perspektyvy rozvytku parku vantazhnykh vahoniv v Ukraini: onovlennya abo prodovzhennya pryznachenoho stroku sluzhby [Current state and prospects for the development of the freight car fleet in Ukraine: renewal or extension of the designated service life]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 4, 4-20
3. Zaripov, R. Yu., Suleymenov, A. D., & Karimova, Z. R. (2021) Issledovaniye nadezhnosti tsel'nometallicheskikh poluvagonov [Study of the reliability of all-metal gondola cars]. *Nauka i tekhnika Kazakhstana – Science and technology of Kazakhstan*, 4, 119–127
4. Martynov, I. E., Shovkun, V. O., Trufanova, A. V., Lytovchenko, O. M., Dmytrenko M. V. & Balashov, O. O. (2023) Doslidzhennya tekhnichnoho stanu universal'nykh napivvahoniv [Research of technical condition of universal gondola cars]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho Derzhavnoho Universytetu Zaliznychnoho Transportu – Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 209, 6-75 [in Ukrainian].
5. Fedosov-Nikonov, D. V., Strynzha, A. M., Shamshey, D. O., Poluliakh, V. M., Fedorov, V. V., & Shushmarchenko, V. O. (2019) Doslidzhennya korozivnykh poshkodzen' elementiv vahoniv pid chas tekhnichnoho diahnostuvannya [Investigation of corrosion damage to wagon elements during technical diagnostics]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 3 (251), 181–184 [in Ukrainian].
6. Zaripov, R. & Gavrilovs, P. (2017) Research Opportunities to Improve Technical and Economic Performance of Freight Car through the Introduction of Lightweight Materials in their Construction. *Procedia Engineering*, 187, 22-29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.345> [in English].
7. Myamlin, S. V. & Kolesnykov, S. R. (2014) Design review of gondola car. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, № 6 (54), 136-145. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/33773> [in English].
8. Lee, W. G., Kim, J-S., Sun, J-Y., & Lim, J-Y. (2018) The next generation material for lightweight railway car body structures: magnesium alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F J Rail Rapid Transit*, 232 (1), 25-42. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716646140> [in English].
9. Baranovskyi, D., Myamlin, S., & Keval I. (2022) Increasing the Carrying Capacity of the Solid-Body Rail Freight Car. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16 (3), 219-225. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/149935> [in English].
10. Baranovskyi, D., Bulakh, M., Bulakh, M. (2026) Determining the service life of a gondola car with an increased floor body safety factor. *Reliability Engineering & System Safety*, 266, Art. 111670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111670> [in English].
11. Fomin, O. V., Horbunov, M. I., Kovalenko, V. V., & Flyarkov'ska, V. O. (2018) Formalizovani

opysannya konstruksiy kryshok lyukiv napivvahoniv (chastyna 2) [Formalized descriptions of the structures of hatch covers of gondola cars (part 2)]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 1 (242), 145-152 [in Ukrainian].

12. Antipin, D. Ya., Racin, D. Y., & Shorokhov, S. G. (2016) Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the Open-Top Wagon Frame by Means of Computer Simulation. *Procedia Engineering*, 150, 150-154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.738> [in English].

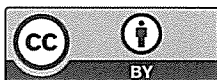
13. Viznyak, R. I., Chepurchenko, I. V., & Lutsenko, A. O. (2016) Osoblyvosti vyznachennya ekspluatatsiynykh navantazhen' kuzova napivvahona ta shlyakhy udoskonalennya yoho konstruksiyi z metoyu zabezpechennya mitsnosti i zberzhennya [Features of determining the operational loads of a gondola body and ways to improve its design to ensure strength and safety]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho Derzhavnoho Universytetu Zaliznychnoho Transportu – Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 159, 91–97. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.159.2016.67018> [in Ukrainian].

14. Mineev, S. P., Prusova, A. A., Vygodin, M. A., & Mineev, A. S. (2012) Osnovnyye tekhnologicheskiye resheniya po effektivnoy razgruzke merzshogo syagruza iz zheleznodorozhnykh poluvagonov [Key technological solutions for efficient unloading of frozen cargo from railway gondola cars]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana – Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 40, 124-130

15. Viznyak, R. I. (2023) Vyznachennia dynamichnykh syl, shcho diut na pivvahon pry rozvantazhenni rotornym vahonoperekydachem. [Determination of dynamic forces acting on a gondola car during unloading by a rotary tipper]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho Derzhavnoho Universytetu Zaliznychnoho Transportu – Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 203, 35-44. Retrieved from: [https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/tht\\_zbirn\\_203\\_2023.pdf](https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/tht_zbirn_203_2023.pdf) [in Ukrainian].

16. Viznyak, R. I. (2025) Vyvantazhennya z zaliznychnykh napivvahoniv nasypanykh vantazhiv udoskonalenyim sposobom perekydannya [Unloading bulk cargo from railway gondolas using an improved tipping method]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho Derzhavnoho Universytetu Zaliznychnoho Transportu – Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 212, 208-216. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336410> [in Ukrainian].

17. Vahony vantazhni. Zahalni vymohy do rozrakhunkiv ta proektuvannia novykh i modernizovanykh vahoniv kolii 1520 mm (nesamokhidnykh) [Freight cars. General requirements for the calculation and design of new and modernized 1520 mm gauge cars (non-self-propelled)]. (2014). DSTU 7598:2014 from 2nd December 2014. Kyiv: SE «UkrNDNTs» [in Ukrainian].



Стаття надійшла 27.04.2026  
Стаття прийнята 30.04.2026  
Опубліковано 29.05.2026