

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-66-72>

УДК 629.4.027.31-272.82

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДЕФОРМУВАННЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ РЕСОРИ В УМОВАХ АВАРІЙНОЇ РОБОТИ

Кузишин А.Я., Ковальчук В.В.

STUDY OF THE PECULIARITIES OF DEFORMATION OF A PNEUMATIC SPRING UNDER CONDITIONS OF ITS EMERGENCY OPERATION

Kuzyshyn A. Ya., Kovalchuk V.V.

Безпека руху є ключовою задачею експлуатації рухомого складу. Враховуючи тенденцію до збільшення швидкостей руху сучасний рухомий склад має конструктивні зміни в механічній частині, а саме застосування пневматичної системи ресорного підвішування. Система має характеристики жорсткості та демпфування. Однак, в процесі експлуатації можливі випадки несправності пневматичної системи (відсутність стисненого повітря), що передбачатиме передачу навантаження кузова на візки через аварійні пружини, які мають значно більшу жорсткість у порівнянні із пневматичною ресорою при її справній роботі. Все це призведе до збільшення сил у в'язях між конструктивними елементами рухомого складу та сил взаємодії колісної пари з рейковою колією, а в подальшому до обмеження швидкостей руху. Таким чином метою статті є експериментальне дослідження особливостей деформування пневматичної ресори в умовах її аварійної роботи та визначення величини вертикального деформування аварійної пружини. Для досягнення цієї мети було розроблено методику експериментальних досліджень вертикального деформування пневматичної ресори в умовах аварійної роботи, яка базується на застосуванні потенціометричного датчика лінійних переміщень, аналого-цифрового перетворювача та ноутбука зі спеціалізованим програмним забезпеченням. У результаті проведених досліджень встановлено закономірності вертикального деформування пневматичної ресори під впливом статичного навантаження від маси кузова під час його осідання внаслідок зниження тиску повітря в системі. Аналіз отриманих закономірностей дозволив встановити чотири основні етапи роботи пневматичної ресори в аварійному режимі: деформування гумокордної

оболонки, контакт кузова з аварійною пружиною, подальше деформування аварійної пружини під навантаженням і завершення її деформації. У ході експерименту зафіксовано, що максимальна величина вертикального деформування аварійної пружини пневматичної ресори досягає 7,18 мм. Наукова новизна отриманих результатів полягає у експериментальному встановленні закономірностей деформування пневматичної ресори в умовах її аварійної роботи та визначенні величини вертикального деформування аварійної пружини. Це дозволить більш точно моделювати роботу пневматичної ресори та в подальшому аналізувати динамічні показники безпеки руху рухомого складу в умовах аварійного режиму роботи пневматичної ресори.

Ключові слова: швидкісний рухомий склад, пневматична ресора, аварійна пружина, деформування, вертикальне навантаження, внутрішній тиск.

Вступ. Збільшення пропускної та провізної здатності залізниці є ключовою задачею її розвитку, що є можливим за рахунок збільшення швидкостей руху. Проте збільшення швидкостей руху передбачає необхідність застосування конструктивних рішень у механічній частині рухомого складу. В першу чергу слід відзначити застосування між кузовом та візками пневматичної системи ресорного підвішування, яка складається із пневматичної ресори (рис. 1), додаткового резервуару, з'єднувального трубопроводу та ін. елементів. Пневматична система дозволяє не тільки підтримувати на одному рівні висоту кузова

(перевага над вітчизняними системами підвішування), але і змінювати жорсткість пневматичної ресори у залежності від завантаженості кузова.

Пневматична ресора складається із кріпильних болтів ущільнювального кільця 1, зажиму плити ковзання 2, болтів ковзаючої плити 3, кріпильної плити 4, ущільнювального кільця 5, ковзаючої плити 6, гумокордної оболонки 7, нижньої плити 8, болтів нижньої плити 9 та аварійної пружини 10.

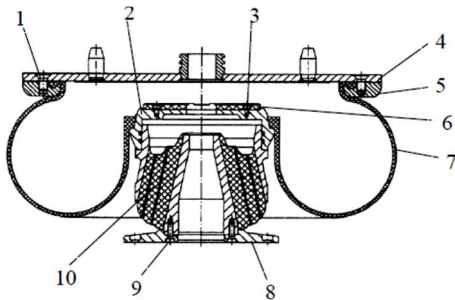


Рис. 1. Пневматична ресора рухомого складу

У залежності від жорсткості пневматичної ресори залежатиме рівень динамічних сил у в'язях механічної частини рухомого складу та динамічні показники безпеки руху [1–2].

Дослідження динамічної поведінки пневматичної ресори становить значний науковий інтерес. Водночас варто зазначити, що переважна більшість робіт у цій галузі мають теоретичну спрямованість, тоді як експериментальним дослідженням приділено недостатньо уваги.

Залежно від типу розв'язуваних рівнянь моделі пневматичних ресор класифікуються на три основні групи [3]: механічні [4–6], термодинамічні [7] та скінченно-елементні [8–9]. Основною характеристикою цих моделей є вертикальна жорсткість пневматичної ресори.

Далі проведемо аналіз праць у яких є експериментальні дослідження вертикальної жорсткості пневматичної ресори, що проведені в лабораторних умовах. У роботі [10] експериментальним шляхом було досліджено роботу пневматичної системи ресорного підвішування в частотному діапазоні від 0 до 400 Гц. Результати показали характерні діапазони частот, де спостерігаються резонансні явища: низькочастотний (до 30 Гц), який пов'язаний із рухом повітря між пневматичною ресорою та додатковим резервуаром; проміжний (від 30 Гц до 150 Гц) та високочастотний (більше 150 Гц) – зумовлені структурною динамікою пневматичної ресори.

У роботі [11] авторами досліджено деформації гумокордної оболонки пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках при зміні внутрішнього тиску в ресорі. Встановлено, що деформація оболонки у горизонтальній площині зростає більш інтенсивно порівняно з вертикальною при збільшенні внутрішнього тиску. Також авторами отримано поліноміальні залежності, які описують деформаційні характеристики гумокордної оболонки пневматичної ресори.

У роботі [12] за допомогою випробувального стенда визначено вертикальну динамічну жорсткість пневматичної системи ресорного підвішування при різних експлуатаційних умовах. Встановлено, що пневматична система ресорного підвішування проявляє нелінійність у діапазоні середніх частот (від 6 до 14 Гц). При зменшенні або збільшенні частоти жорсткість системи стабілізується на фіксованому рівні, що відповідає статичній та динамічній жорсткості пневматичної ресори.

У роботі [13] авторами застосовано чотири експериментальні методи для оцінки статичної та квазістатичної вертикальної жорсткості пневматичної ресори. Показано, що отримані залежності жорсткості–навантаження мають нелінійний характер. Зазначено, що жорсткість гумокордної оболонки відіграє значну роль при невеликих навантаженнях, тоді як її вплив суттєво зменшується при високих навантаженнях.

У дослідженні [14] наведено результати експериментальних випробувань, які були проведені відповідно до вимог стандарту EN 13597, з метою уточнення параметрів пневматичної ресори. Автори застосували вертикальне навантаження величиною 109,8 кН з амплітудою коливань ± 10 мм у частотному діапазоні 0,5–10 Гц. Отримані результати є важливими для уточнення динамічних характеристик підвіски в умовах реальної експлуатації.

У роботі [15] виконано експериментальне дослідження динамічної поведінки пневматичної системи ресорного підвішування за різних конфігурацій з'єднання між пневморесорою та додатковим резервуаром. Під час випробувань варіювались параметри амплітуди збурення та частоти коливань. Результати показали, що для ефективного демпфування низькочастотних збурень найкращі характеристики забезпечує конфігурація типу «bellow–orifice–pipe–

reservoir». У той час як для високочастотних збурень більш ефективною виявилася схема «bellow–orifice–reservoir».

У дослідженні [16] для моделювання динамічної поведінки пневматичної системи підвищення за різних конфігурацій і режимів роботи було розроблено випробувальний стенд. Основну увагу зосереджено на дослідженні вертикального напрямку, з огляду на його ключовий вплив на комфорт пасажирів, безпеку руху та динамічну взаємодію колісних пар із рейковою колією. У ході експериментальних досліджень виявлено суттєву залежність характеристик системи від амплітуди збурень, частоти впливу та попереднього навантаження.

На підставі аналізу праць [10–16] зроблено висновок, що динамічна поведінка пневматичних ресор досліджується за допомогою різноманітних експериментальних методик, що дозволяє детально вивчати вплив окремих параметрів системи.

Однак у процесі експлуатації рухомого складу можливі випадки несправності пневматичної системи ресорного підвищення, що передбачатиме відсутність стисненого повітря. У такому випадку навантаження, яке передаватиметься від кузова на візки буде передаватись через аварійну пружину. Слід зазначити, що жорсткість аварійної пружини є значно більшою за жорсткість ресори при нормальній роботі пневматичної системи, що у свою чергу змінюватиме рівень динамічних сил та впливатиме на стан безпеки руху.

Отже, проаналізувавши вищенаведені наукові роботи, слід відзначити, що на даний час проведено значну кількість досліджень по визначенню вертикальної жорсткості ресори при нормальній роботі пневматичної системи ресорного підвищення. Однак, невирішеним завданням залишається дослідження особливостей деформування пневматичної ресори в умовах її аварійної роботи.

Метою роботи є експериментальне дослідження особливостей деформування пневматичної ресори в умовах її аварійної роботи та визначення величини вертикального деформування аварійної пружини.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

1. Розробити методику експериментальних досліджень деформування пневматичної ресори в умовах її аварійних роботи.

2. Побудувати залежності деформування ресори при спуску повітря із пневматичної системи ресорного підвищення та встановити

величину вертикального деформування аварійної пружини.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження особливостей деформування пневматичної ресори в умовах її аварійної роботи під впливом статичного навантаження від маси кузова було проведено експериментальні вимірювання. У випробуваннях застосовувався потенціометричний датчик лінійного переміщення, аналого-цифровий перетворювач та ноутбук зі спеціалізованим програмним забезпеченням для фіксації даних. Експеримент було проведено для дизель-поїзда ДПКр-3 на території моторвагонного депо Львівської залізниці (рис. 2).



Рис. 2. Схема та інформаційно-вимірювальне забезпечення для проведення записів деформування пневматичної ресори рухомого складу

Особливості деформування ресори рухомого складу досліджувалися у двох режимах роботи. У першому випадку здійснювався одночасний спуск повітря з двох ресор, встановлених на першому візку. У другому – проводилося нагнітання повітря в ресори до тиску 7 атм.

Деформації пневматичної ресори реєструвалися високочастотним потенціометричним датчиком лінійних переміщень із частотою дискретизації 1000 Гц. Отримані сигнали оцифровувалися за допомогою аналого-цифрового перетворювача та зберігалися на комп'ютері для подальшої обробки й аналізу.

У результаті спуску повітря були зафіксовані закономірності деформування пневматичної ресори під дією ваги кузова рухомого складу під час його осідання (рис. 3).

Під час закачування повітря зафіксовано зворотний процес, а саме підйом кузова та відповідне деформування ресори у протилежному напрямку під дією того ж навантаження (рис. 4).

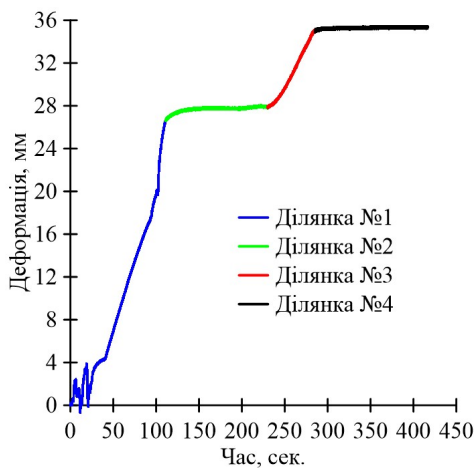


Рис. 3. Деформування ресори під дією ваги кузова рухомого складу під час його осідання внаслідок спуску повітря

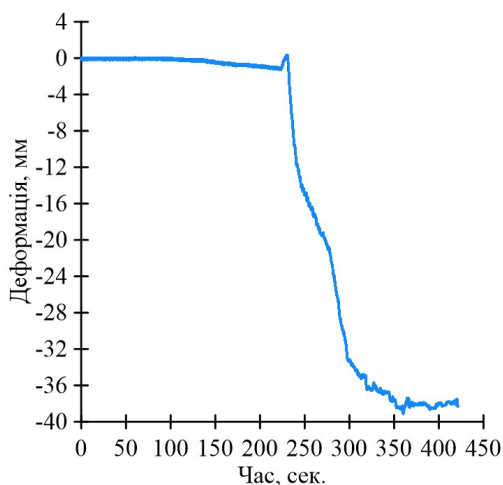


Рис. 4. Деформування ресори при закачуванні повітря до 7 атм. під дію ваги кузова рухомого складу

Проведені експериментальні дослідження дали змогу визначити величини деформацій пневматичної ресори під час осідання кузова на аварійну пружину, що є важливим при оцінюванні її поведінки в умовах аварійного режиму експлуатації.

Аналіз залежності деформування пневматичної ресори під дією ваги кузова рухомого складу під час спуску повітря (рис. 3) свідчить про наявність чітко виражених етапів:

– на ділянці №1 спостерігається деформування гумокордної оболонки ресори внаслідок зниження тиску повітря. Величина

деформації на цій ділянці становила 26,7 мм. Варто зазначити, що на момент початку спуску повітря не було точної інформації щодо поточного тиску в системі, а також не було підтверджено, чи відповідає зазор між верхньою пластиною та аварійною пружиною номінальному значенню.

– на ділянці №2 фіксується момент, коли кузов рухомого складу опускається на аварійну пружину. Як бачимо різкого просідання кузова не відбувається, що пов'язано із залишковим тиском в пневматичній ресорі.

– на ділянці №3 (після повного виходу повітря) відбувається деформування аварійної пружини під навантаженням від маси кузова. Величина деформації аварійної пружини склала 7,18 мм.

– на ділянці №4 деформування аварійної пружини припиняється, що свідчить про досягнення стану статичної рівноваги системи.

При закачуванні повітря в пневматичну ресору була зафіксована вертикальна деформація розміром 38,6 мм. Така величина деформування відповідає очікуваним технічним характеристикам ресори та свідчить про правильність проведених вимірювань і коректність експериментальної установки. Отримані дані підтверджують адекватність методики вимірювання та дозволяють використовувати їх для подальшого аналізу поведінки ресори під навантаженням.

Отже, отримані експериментальні дані дозволяють сформулювати комплексне уявлення про механізми деформування пневматичної ресори, включаючи поведінку аварійної пружини. Це створює основу для подальшого моделювання динамічних процесів рухомого складу в аварійних режимах експлуатації та сприяє розробці більш ефективних методів прогнозування його надійності та безпеки.

Висновки. Розроблено методику експериментальних досліджень вертикального деформування пневматичної ресори в умовах аварійної роботи, яка базується на застосуванні потенціометричного датчика лінійних переміщень, аналого-цифрового перетворювача та ноутбука зі спеціалізованим програмним забезпеченням.

Встановлено закономірності вертикального деформування пневматичної ресори під дією ваги кузова при осіданні, викликаному спуском повітря.

Виділено чотири ключові стадії роботи ресори: деформування гумокордної оболонки, осідання кузова на аварійну пружину,

деформування аварійної пружини під навантаженням та завершення її деформування. Встановлено, що величина вертикального деформування аварійної пружини пневматичної ресори становить 7,18 мм.

Отримані результати сприяють подальшому їх використанню при встановленні вертикальної жорсткості аварійної пружини та дослідженню динамічних показників безпеки руху рухомого складу в умовах аварійної роботи пневматичної ресори.

Література

1. Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension / A. Kuzyshyn et al. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 234. P. 05003. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823405003>.
2. Кузишин А. Я., Ковальчук В. В., Соболевська Ю. Г. Встановлення коефіцієнтів вертикальної динаміки другого ступеня ресорного підвішування швидкісного електропоїзда ЕКр-1 «Тарпан». *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. Т. 30, № 1. С. 29–36. URL: <https://doi.org/10.18664/iksz.v30i1.326788>.
3. Світовий досвід створення математичних моделей пневматичної ресори: переваги та недоліки / А. Я. Кузишин та ін. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 4(94). С. 25–42. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2021/245974>.
4. Wheel–rail dynamic of DMU IC4 car for DSB: modeling of the secondary air springs and effects on calculation results / C. Pellegrini et al. *Vehicle System Dynamics*. 2006. Vol. 44, sup1. P. 433–442. URL: <https://doi.org/10.1080/00423110600872960>.
5. Aizpun M., Vinolas J., Alonso A. Using the stationary tests of the acceptance process of a rail vehicle to identify the vehicle model parameters. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2013. Vol. 228, no. 4. P. 408–421. URL: <https://doi.org/10.1177/0954409713478592>.
6. Berg M. A Three–Dimensional Airspring Model with Friction and Orifice Damping. *Vehicle System Dynamics*. 1999. Vol. 33, sup1. P. 528–539. URL: <https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063109>.
7. Docquier N., Fissette P., Jeanmart H. Multiphysic modelling of railway vehicles equipped with pneumatic suspensions. *Vehicle System Dynamics*. 2007. Vol. 45, no. 6. P. 505–524. URL: <https://doi.org/10.1080/00423110601050848>.
8. Xu L. Mathematical Modeling and Characteristic Analysis of the Vertical Stiffness for Railway Vehicle Air Spring System. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 2020. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/2036563>.
9. Berry D. T., Yang H. T. Y. Formulation and experimental verification of a pneumatic finite element. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1996. Vol. 39, no. 7. P. 1097–1114.
10. Analysis and modelling of the dynamic stiffness up to 400 Hz of an air spring with a pipeline connected to a reservoir / I. Mendia-Garcia et al. *Journal of Sound and Vibration*. 2023. P. 117740. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.117740>.
11. Кузишин А. Я., Ковальчук В. В. Експериментальні дослідження закономірностей деформування гумокордної оболонки пневматичної ресори швидкісного рухомого складу. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 2(106). С. 53–63. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2024/306143>.
12. Air suspension characterisation and effectiveness of a variable area orifice / A. Alonso et al. *Vehicle System Dynamics*. 2010. Vol. 48, sup1. P. 271–286. URL: <https://doi.org/10.1080/00423111003731258>.
13. Li X., Li T. Research on vertical stiffness of belted air springs. *Vehicle System Dynamics*. 2013. Vol. 51, no. 11. P. 1655–1673. URL: <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.819984>.
14. Sayyaadi H., Shokouhi N. Effects of air reservoir volume and connecting pipes' length and diameter on the air spring behavior in rail–vehicles. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering*. 2010. Vol. 34, No. 5. P. 499–508. DOI: <https://doi.org/10.22099/ijstm.2010.916>.
15. Study on Different Connection Types of Air Spring / H. X. Gao et al. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 423–426. P. 2026–2034. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.423-426.2026>.
16. Mazzola L., Berg M. Secondary suspension of railway vehicles - air spring modelling: Performance and critical issues. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2012. Vol. 228, no. 3. P. 225–241. URL: <https://doi.org/10.1177/0954409712470641>.

References

1. Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension / A. Kuzyshyn et al. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 234. P. 05003. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823405003>.
2. Kuzyshyn A. Ya., Kovalchuk V. V., Sobolevska Yu. H. Vstanovlennia koefitsientiv vertykalnoi dynamiky druhoho stupenia resornoho pidvishuvannia shvydkisnoho elektrovozda EKr-1 «Tarpan». *Informatsiino-keruiuchi systemy na*

- zaliznychnomu transporti. 2025. T. 30, № 1. S. 29–36. URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i1.326788>.
 3. Svitovyi dosvid stvorennia matematychnykh modelei pnevmatychnoi resory: perevahy ta nedoliky / A. Ya. Kuzyshyn ta in. Nauka ta prohres transportu. 2021. № 4(94). S. 25–42. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2021/245974>.
 4. Wheel–rail dynamic of DMU IC4 car for DSB: modeling of the secondary air springs and effects on calculation results / C. Pellegrini et al. *Vehicle System Dynamics*. 2006. Vol. 44, sup1. P. 433–442. URL: <https://doi.org/10.1080/00423110600872960>.
 5. Aizpun M., Vinolas J., Alonso A. Using the stationary tests of the acceptance process of a rail vehicle to identify the vehicle model parameters. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2013. Vol. 228, no. 4. P. 408–421. URL: <https://doi.org/10.1177/0954409713478592>.
 6. Berg M. A Three-Dimensional Airspring Model with Friction and Orifice Damping. *Vehicle System Dynamics*. 1999. Vol. 33, sup1. P. 528–539. URL: <https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063109>.
 7. Docquier N., Fiset P., Jeanmart H. Multiphysic modelling of railway vehicles equipped with pneumatic suspensions. *Vehicle System Dynamics*. 2007. Vol. 45, no. 6. P. 505–524. URL: <https://doi.org/10.1080/00423110601050848>.
 8. Xu L. Mathematical Modeling and Characteristic Analysis of the Vertical Stiffness for Railway Vehicle Air Spring System. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 2020. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/2036563>.
 9. Berry D. T., Yang H. T. Y. Formulation and experimental verification of a pneumatic finite element. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1996. Vol. 39, no. 7. P. 1097–1114.
 10. Analysis and modelling of the dynamic stiffness up to 400 Hz of an air spring with a pipeline connected to a reservoir / I. Mendia-Garcia et al. *Journal of Sound and Vibration*. 2023. P. 117740. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.117740>.
 11. Kuzyshyn A. Ya., Kovalchuk V. V. Eksperymentalni doslidzhennia zakonomirnostei deformuvannia humokordnoi obolonky pnevmatychnoi resory shvydkisnoho rukhomoho skladu. Nauka ta prohres transportu. 2024. № 2(106). S. 53–63. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2024/306143>.
 12. Air suspension characterisation and effectiveness of a variable area orifice / A. Alonso et al. *Vehicle System Dynamics*. 2010. Vol. 48, sup1. P. 271–286. URL: <https://doi.org/10.1080/00423111003731258>.
 13. Li X., Li T. Research on vertical stiffness of belted air springs. *Vehicle System Dynamics*. 2013. Vol. 51, no. 11. P. 1655–1673. URL: <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.819984>.
 14. Sayyaadi H., Shokouhi N. Effects of air reservoir volume and connecting pipes' length and diameter on the air spring behavior in rail–vehicles. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering*. 2010. Vol. 34, No. 5. P. 499–508. DOI: <https://doi.org/10.22099/ijstm.2010.916>.
 15. Study on Different Connection Types of Air Spring / H. X. Gao et al. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 423–426. P. 2026–2034. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.423-426.2026>.
 16. Mazzola L., Berg M. Secondary suspension of railway vehicles - air spring modelling: Performance and critical issues. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2012. Vol. 228, no. 3. P. 225–241. URL: <https://doi.org/10.1177/0954409712470641>.
- Kuzyshyn, A. Ya., Kovalchuk, V. V. Study of the peculiarities of deformation of a pneumatic spring under conditions of its emergency operation**
- Traffic safety is a key aspect of rolling stock operation. Given the trend toward increasing speeds, modern rolling stock features structural changes in its mechanical systems, particularly the implementation of pneumatic suspension systems. This system possesses specific stiffness and damping characteristics. However, during operation, malfunctions of the pneumatic system may occur (such as the absence of compressed air), which leads to the transfer of the vehicle body's load to the bogies via emergency springs. These springs exhibit significantly higher stiffness compared to a functioning pneumatic spring. This situation results in increased forces in the connections between the structural elements of the rolling stock and greater interaction forces between the wheelset and the rail track, ultimately leading to speed restrictions. The aim of this study is to experimentally investigate the deformation behavior of the pneumatic spring under emergency operating conditions and to determine the magnitude of the vertical deformation of the emergency spring. To achieve this goal, a methodology for experimental research was developed. It focuses on studying the vertical deformation of the pneumatic spring in emergency mode and is based on the use of a potentiometric linear displacement sensor, an analog-to-digital converter, and a laptop with specialized software. As a result, regularities in the vertical deformation of the pneumatic spring under the influence of static load from the vehicle body mass during pressure loss in the system were identified. Analysis of these patterns allowed for the identification of four main stages of pneumatic spring*

operation in emergency mode: deformation of the rubber-cord casing, contact of the vehicle body with the emergency spring, further deformation of the emergency spring under load, and completion of its deformation. During the experiment, it was recorded that the maximum vertical deformation of the emergency spring in the pneumatic suspension system reached 7.18 mm. The scientific novelty of the obtained results lies in the experimental identification of the deformation behavior of the pneumatic spring under emergency conditions and the determination of the emergency spring's vertical deformation value. This will enable more accurate modeling of pneumatic suspension performance and support further analysis of the dynamic safety indicators of rolling stock under emergency pneumatic system operation.

Keywords: *pneumatic spring, emergency spring, deformation, vertical load, internal pressure*

Кузишин Андрій Ярославович – доктор філософії (PhD), доцент кафедри «Залізничний транспорт», Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua

Ковальчук Віталій Володимирович – д.т.н., професор, професор кафедри «Залізничний транспорт», Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, kovalchuk.diit@gmail.com

Стаття подана 18.09.2025.