

УДК 629.4.027.31-272.82

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОДАТКОВОГО РЕЗЕРВУАРА НА ДЕФОРМУВАННЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ РЕСОРИ ШВИДКІСНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦІ**

Д-р філософії А. Я. Кузишин, д-р техн. наук В. В. Ковальчук

**AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF AN ADDITIONAL TANK ON THE DEFORMATION OF THE PNEUMATIC SPRING OF HIGH-SPEED RAILWAY ROLLING STOCK**

PhD A. Kuzyshyn, Doctor of Technical Sciences V. Kovalchuk

*Анотація.* У статті проведено дослідження впливу додаткового резервуара пневматичної системи ресорного підвішування на деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори. Для цього розроблено методологію проведення експериментальних досліджень із використанням випробувальної установки. Установлено, що вплив додаткового резервуара на величину вертикального деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки є незначним за внутрішніх тисків у ресорі до 2,5 атм. Проте за манометричного тиску більше 2,5 атм перекриття крана перед додатковим резервуаром призводить до більшого деформування гумо-кордної оболонки порівняно з деформуванням при відкритому крані та включенні у пневматичну систему ресорного підвішування додаткового резервуара.

*Ключові слова:* пневматична ресора, додатковий резервуар, деформування, тиск, гумо-кордна оболонка.

**Abstract.** The use of a pneumatic spring suspension system in the second stage of spring suspension of high-speed rolling stock is an integral component of ensuring its permissible dynamic indicators and traffic safety indicators. This work is aimed at researching the deformation characteristics of the rubber-cord shell of the pneumatic spring in the vertical and horizontal directions, taking into account manometric pressure, external load and an auxiliary reservoir. To achieve the goal, a methodology for experimental studies of pneumatic spring deformation was developed using a test rig with an assembled pneumatic spring suspension system, power and measuring equipment. Deformations of the rubber-cord sheath were measured by analog sensors of linear displacements using an analog-to-digital converter and special software. It was established that the effect of the auxiliary reservoir on the amount of vertical deformation of the lower part of the rubber-cord shell does not exceed 3.46 %, which allows us to conclude that the auxiliary reservoir of the pneumatic spring suspension system has a negligible effect on the vertical deformations of the lower part of the rubber-cord shell of the pneumatic spring. The dependences of the deformation of the rubber-cord shell of the pneumatic spring in the horizontal direction on the value of the manometric pressure when the auxiliary reservoir is connected and disconnected are obtained. It was established that in the range of manometric pressure changes of 1.0÷2.5 atm the presence or absence of an auxiliary reservoir has little effect on the amount of deformation of the rubber-cord sheath in the horizontal direction. However, at a pressure of more than 2.5 atm, closing the tap to the auxiliary reservoir leads to significantly greater deformation of the rubber cord shell compared to the deformation when the tap is open and the auxiliary reservoir is turned on. The obtained results regarding the deformation characteristics of the rubber-cord shell of the pneumatic spring will allow us to proceed to the study of the dynamic characteristics of the pneumatic spring, which are necessary when establishing safe conditions for the operation of modern high-speed rolling stock at the stage of its design.

**Keywords:** air spring, auxiliary reservoir, deformation, pressure, rubber-cord shell.

**Вступ.** Пневматична система ресорного підвішування, застосовувана у другому ступені ресорного підвішування сучасного швидкісного рухомого складу залізниці, є невід’ємною складовою забезпечення допустимих динамічних

показників і показників безпеки його руху [1, 2]. Основними конструктивними складовими пневматичної системи ресорного підвішування є пневматична ресора, додатковий резервуар і з’єднувальний трубопровід (рис. 1).

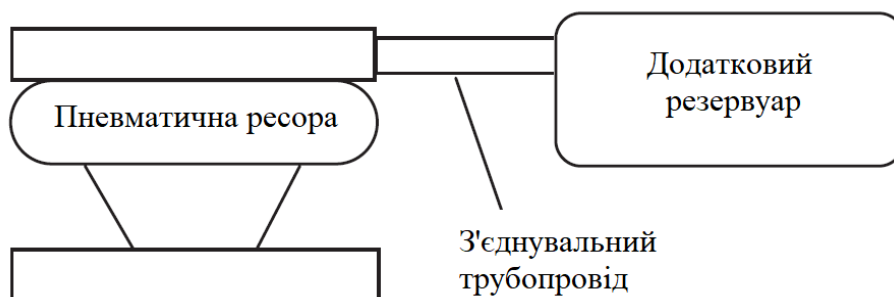


Рис. 1. Основні складові елементи пневматичної системи ресорного підвішування

Використання пневматичної системи ресорного підвішування на швидкісному

рухомому складі насамперед дає змогу замінити великогабаритні та масивні

металеві конструктивні елементи, а також забезпечити змінну жорсткість і високі демпфувальні властивості системи [3].

Слід зазначити, що жорсткість пневматичної ресори залежить не тільки від стану повітря, але і конструктивних особливостей гумо-кордної оболонки та загального об'єму пневматичної системи ресорного підвішування. Тому актуальним є завдання дослідження деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори з урахуванням манометричного тиску, зовнішнього навантаження та додаткового резервуара. Це дасть змогу встановити різницю роботи гумо-кордної оболонки пневматичної ресори з додатковим резервуаром і без нього, а також перейти до дослідження динамічної жорсткості пневматичної ресори.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Математичні моделі, які описують роботу пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках, відображено в роботі [4].

Робота [5] спрямована на визначення та порівняння альтернативних підходів до математичного моделювання пневматичної ресори, впливу її динамічних характеристик на багатомасове моделювання залізничного рухомого складу. Використовуючи лабораторне обладнання, розроблено два різних підходи до моделювання пневматичної системи ресорного підвішування: квазістатичний і динамічний. Проте дослідження особливостей деформування гумо-кордної оболонки за наявності та відсутності додаткового резервуара в цій роботі не проведено.

У роботах [6, 7] авторами за допомогою аеродинаміки, механіки рідини, структурної механіки, інженерної термодинаміки розроблено різні моделі пневматичної системи ресорного підвішування та досліджено динамічні характеристики пневматичної ресори за різних амплітуд і частот збудження. Встановлено, що для демпфування низькочастотних збуджень найкращою є

система «пневматична ресора – демпфувальний отвір – з'єднувальний трубопровід – додатковий резервуар», а для високочастотних збуджень рекомендовано «пневматична ресора – демпфувальний отвір – додатковий резервуар». Використання пневматичної системи ресорного підвішування за типом «пневматична ресора – з'єднувальний трубопровід – додатковий резервуар» не рекомендовано, оскільки система за такого з'єднання має від'ємну жорсткість. Дослідження роботи пневматичної ресори, а саме її вертикальне та горизонтальне деформування у випадку зміни внутрішнього тиску та впливу додаткового резервуару в цих роботах не проведено.

У роботі [8] авторами проведено дві групи експериментів для моделювання політропного процесу у пневматичних ресорах. Встановлено, що механічна поведінка пневматичної ресори переважно залежить від політропного процесу з певним індексом політропи. Встановлено, що термодинамічний процес у пневматичній ресорі можна вважати адіабатичним за частоти збудження більше 5 Гц, а політропним – за частоти менше 5 Гц. Крім того, побудовано залежності вертикальної жорсткості пневматичної ресори від зміни вертикального навантаження за різних значень об'єму додаткового резервуара, але не проведено досліджень роботи гумо-кордної оболонки як складової динамічної жорсткості пневматичної ресори.

У роботі [9] проведено математичне моделювання пневматичної ресори та аналіз її вертикальної жорсткості. При цьому геометричні параметри пневматичної ресори визначали наближеним аналітичним методом. Однак не отримано залежностей деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках.

У роботі [10] авторами наведено модель пневматичної системи ресорного підвішування в поєднанні з клапанами вирівнювання та перепаду тиску для

моделювання динаміки залізничного рухомого складу. Зазначено важливість урахування нелінійних характеристик конструктивних складових пневматичної системи ресорного підвішування для оцінювання безпеки рухомого складу на низьких швидкостях руху та кривих ділянках колії.

У роботі [11] змодельовано роботу пневматичної системи ресорного підвішування сучасного швидкісного рухомого складу як у вертикальному, так і горизонтальному напрямках. При цьому у вертикальному напрямку сила реакції пневматичної ресори отримана з рівнянь пневматики, а в горизонтальному напрямку використовували квадратичну функцію, яка була розрахована з використанням методу скінченних елементів.

У роботі [12] авторами досліджено динамічну жорсткість пневматичної ресори на основі розробленої узагальненої аналітичної моделі, враховуючи термодинаміку пневматичної системи «пневматична ресора – з'єднувальний трубопровід – додатковий резервуар», ефективно тертя і в'язкопружне тертя гумо-кордної оболонки. Однак у роботі не досліджено роботу гумо-кордної оболонки в горизонтальному напрямку за прикладання зовнішнього вертикального навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує важливість питання дослідження роботи пневматичної системи ресорного підвішування та визначення її динамічних характеристик. Однак невіршеним завданням залишається дослідження поведінки гумо-кордної оболонки за різних манометричних тисків у пневматичній ресорі з урахуванням впливу додаткового резервуара.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є експериментальне дослідження впливу додаткового резервуара пневматичної системи ресорного підвішування на деформування гумо-кордної оболонки

пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Розробити методологію експериментальних досліджень деформування пневматичної ресори залежно від робочого стану додаткового резервуара пневматичної системи ресорного підвішування.

2. Дослідити вплив додаткового резервуара пневматичної системи ресорного підвішування на деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках.

**Основна частина дослідження.** Визначення закономірностей деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори швидкісного складу проводили в лабораторних умовах. Випробувальну установку з зібраною пневматичною системою ресорного підвішування та силовим і вимірювальним обладнанням зображено на рис. 2.

Методика експериментальних досліджень передбачала проведення випробувань пневматичної ресори залежно від внутрішнього тиску та величини прикладеного зовнішнього навантаження у двох станах роботи додаткового резервуара. Перший стан робочий – додатковий резервуар включено в загальну роботу пневматичної системи ресорного підвішування, другий – додатковий резервуар не включено в загальну роботу пневматичної системи ресорного підвішування. Першого стану можна досягти відкриттям крана на з'єднувальному трубопроводі, а другого – перекриттям (рис. 3).

Випробування пневматичної ресори проведено за зміни манометричного тиску в ресорі від 0 до 5 атм. Підвищення манометричного тиску здійснювали ступенями по 0,5 атм. На кожному підвищенні тиску на 0,5 атм прикладали зовнішнє навантаження за допомогою домкрата і фіксували вертикальні та

горизонтальні деформації гумо-кордної оболонки ресори. При цьому прикладення зовнішнього навантаження і вимірювання деформацій проводили двічі на кожному ступені зміни манометричного тиску, а саме за ввімкнення додаткового резервуара та

вимкнення його під час роботи пневматичної системи ресорного підвішування. Зміну величини манометричного тиску контролювали манометричним датчиком високого тиску, розташованим на з'єднувальному трубопроводі.

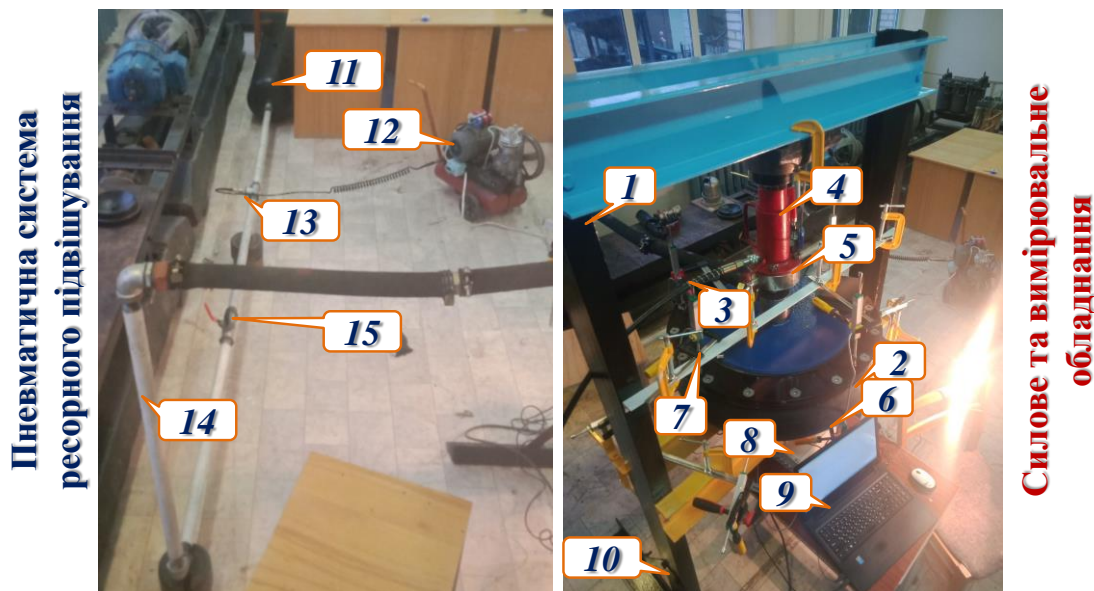


Рис. 2. Схема стенда для випробування пневматичної ресори швидкісного рухомого складу: 1 – П-подібна стійка; 2 – пневматична ресора швидкісного рухомого складу; 3 – ручний насос гідравлічний із рукавом високого тиску; 4 – гідравлічний домкрат; 5 – тензометричний датчик сили; 6 – прилад зчитування значень прикладеної сили; 7 – лінійні датчики переміщень; 8 – аналого-цифровий перетворювач; 9 – персональний комп’ютер; 10 – нерухома основа; 11 – додатковий резервуар; 12 – компресор; 13 – манометр; 14 – з’єднувальний трубопровід; 15 – кран



Рис. 3. Стани додаткового резервуара

Навантаження на пневматичну ресору задано гідравлічним домкратом, при цьому контролювали його значення тензометричним датчиком сили.

Деформації гумо-кордної оболонки виміряно аналоговими датчиками лінійних переміщень із використанням аналого-цифрового перетворювача та спеціального програмного забезпечення. Виміряні дані, збережені в пам'яті персонального комп'ютера, згодом аналізували.

**Результати експериментальних досліджень.** На основі проведених експериментальних досліджень отримано особливості деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори залежно від робочих станів додаткового резервуара. На

рис. 4–8 показано вплив додаткового резервуара пневматичної системи ресорного підвішування на деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки пневматичної ресори.

Із рис. 4 видно, що за манометричного тиску в ресорі 0,5 атм і вертикального навантаження 40,80 і 40,40 кН, що відповідає граничній роботі пневматичної ресори при вимкненому і ввімкненому додатковому резервуарі пневматичної системи ресорного підвішування відповідно, нижня частина гумо-кордної оболонки деформується на величину 22,96 мм (резервуар вимкнений) порівняно з 22,50 мм (резервуар ввімкнений).

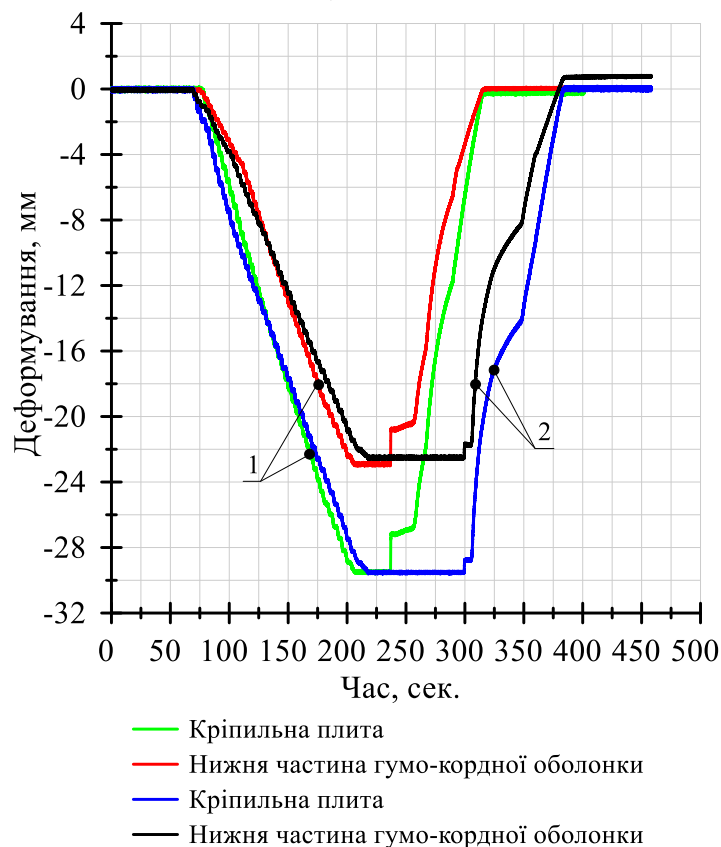


Рис. 4. Вертикальне переміщення кріпильної плити та деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки за манометричного тиску 0,5 атм:

- 1 – додатковий резервуар вимкнено;
- 2 – додатковий резервуар ввімкнено

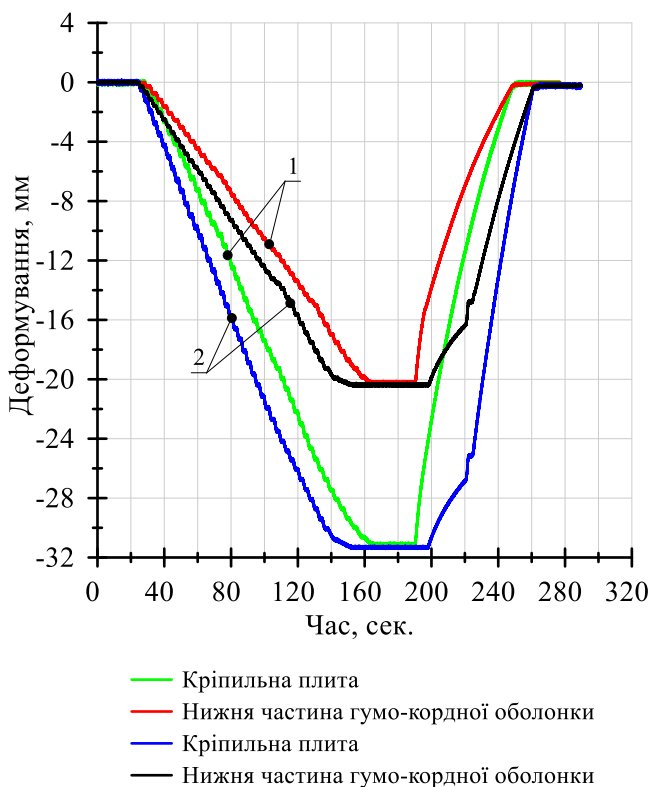


Рис. 5. Вертикальне переміщення кріпильної плити та деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки за манометричного тиску 1,5 атм: 1 – додатковий резервуар вимкнено; 2 – додатковий резервуар ввімкнено

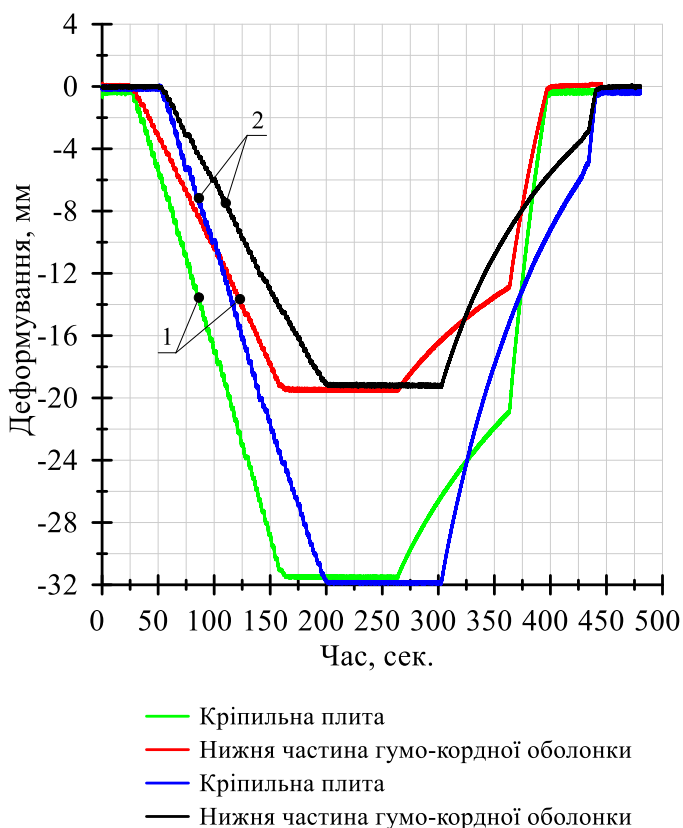


Рис. 6. Вертикальне переміщення кріпильної плити та деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки за манометричного тиску 2,5 атм: 1 – додатковий резервуар вимкнено; 2 – додатковий резервуар ввімкнено

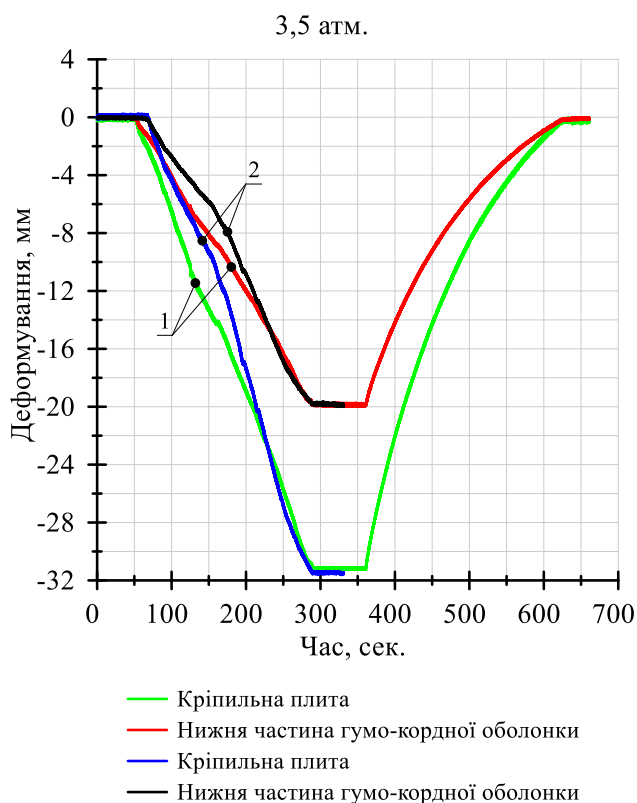


Рис. 7. Вертикальне переміщення кріпильної плити та деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки за манометричного тиску 3,5 атм: 1 – додатковий резервуар вимкнено; 2 – додатковий резервуар ввімкнено

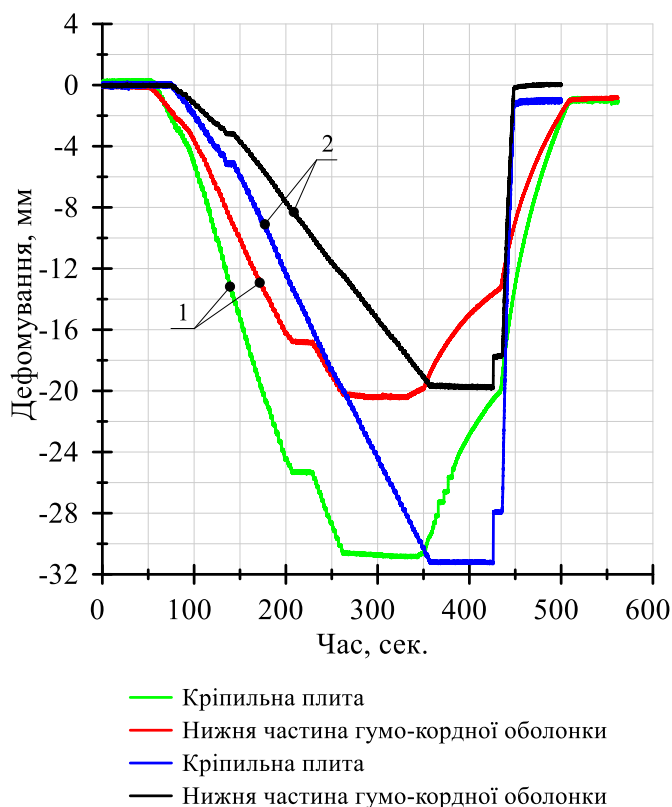


Рис. 8. Вертикальне переміщення кріпильної плити та деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки за манометричного тиску 4,5 атм: 1 – додатковий резервуар вимкнено; 2 – додатковий резервуар ввімкнено



При подальшому збільшенні манометричного тиску вплив додаткового резервуара на величину деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки не перевищує 3,46 %. Це дає змогу зробити висновок про незначний вплив додаткового резервуара пневматичної системи ресорного підвищення на вертикальні деформації

нижньої частини гумо-кордної оболонки пневматичної ресори.

При прикладанні на пневматичну ресору вертикального навантаження відбувається також деформування гумо-кордної оболонки в горизонтальному напрямку, характер зміни якого показано на рис. 9.

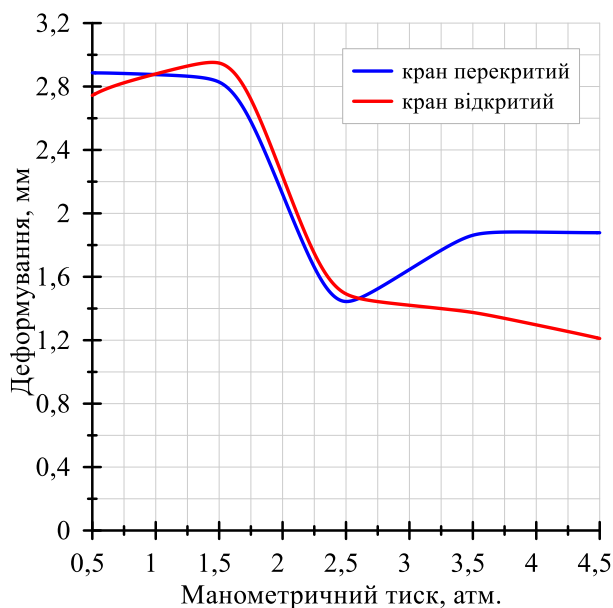


Рис. 9. Залежність деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори в горизонтальному напрямку залежно від величини манометричного тиску

Аналізуючи рис. 9, встановлено, що в діапазоні зміни манометричного тиску 1,0÷2,5 атм наявність чи відсутність додаткового резервуара пневматичної системи ресорного підвищення має незначний вплив на величину деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори в горизонтальному напрямку.

За манометричного тиску більше 2,5 атм перекриття крана до додаткового резервуара призводить до більшого деформування гумо-кордної оболонки порівняно з деформуванням при відкритому крані та ввімкненому додатковому резервуарі.

**Висновки.** Розроблено методологію експериментальних досліджень деформування гумо-кордної оболонки пневматичної

ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках залежно від умов експлуатації пневматичної системи ресорного підвищення.

Встановлено, що вплив додаткового резервуара на величину вертикального деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки не перевищує 3,46 %. Побудовано залежності деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори в горизонтальному напрямку від величини манометричного тиску при ввімкненому та вимкненому додатковому резервуарі.

Зазначено, що в діапазоні манометричного тиску 1,0÷2,5 атм додатковий резервуар не має значного впливу

на величину деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори в горизонтальному напрямку. За подальшого збільшення тиску перекриття крана до

додаткового резервуара призводить до більшого деформування гумо-кордної оболонки порівняно з деформуванням при відкритому крані.

### Список використаних джерел

1. Kuzyshyn A., Batig A., Kostritsa S., Sobolevska J., Kovalchuk V., Dovhanyuk S., Voznyak O. Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension. *BulTrans 2018: 10th Intern. Sci. Conf. on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies*. Vol. 234 (2018). URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823405003>.
2. Kuzyshyn A., Batig A., Kostritsa S., Sobolevska J., Dovhaniuk S., Dzhus V. Study of the Dynamic Behavior of Rolling Stock using a Computer Experiment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 15th Intern. Sci. and Techn. Conf. «Problems of the railway transport mechanics» (PRTM 2020)*. Dnipro, Ukraine (2020). Vol. 985. DOI 10.1088/1757-899X/985/1/012002.
3. Kuzyshyn A., Kovalchuk V., Stankevych V., Hilevych V. Determining patterns in the influence of the geometrical parameters of the connecting pipeline on the dynamic parameters of the pneumatic spring of railroad rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. 1/7(121). P. 57–65. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274180>.
4. Кузишин А. Я., Костриця С. А., Соболевська Ю. Г., Батіг А. В. Світовий досвід створення математичних моделей пневматичної ресори: переваги та недоліки. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 4 (94). С. 25–42. DOI: 10.15802/stp2021/245974.
5. Facchinetti A., Mazzola L., Alfi S., Bruni S. Mathematical modelling of the secondary airspring suspension in railway vehicles and its effect on safety and ride comfort. *Vehicle System Dynamics*. 2010. Vol. 48. Is. sup1. P. 429–449. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2010.486036>.
6. Gao H. X., Chi M. R., Zhu M. H., Wu P. B. Study on different connection types of air spring. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 423–426. P. 2026–2034. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.423-426.2026>.
7. Sihong Z., Jiasheng W., Ying Z. Research on theoretical calculation model for dynamic stiffness of air spring with auxiliary chamber. *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (Harbin, 3-5 Sept. 2008). Harbin, 2008. P. 2–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/vppc.2008.4677717>.
8. Li X., Wei Y., He Y. Simulation on polytropic process of air springs. *Engineering Computations*. 2016. Vol. 33. Is. 7. P. 1957–1968. DOI: <https://doi.org/10.1108/EC-08-2015-0224>.
9. Xu L. Mathematical modeling and characteristic analysis of the vertical stiffness for railway vehicle air spring system. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 220. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/2036563>.
10. Nakajima T., Shimokawa Y., Mizuno M., Sugiyama H. Air Suspension System Model Coupled With Leveling and Differential Pressure Valves for Railroad Vehicle Dynamics Simulation. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*. 2014. Vol. 9. Is. 3. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4026275>.
11. Qi Z., Li F., Yu D. A three-dimensional coupled dynamics model of the air spring of a high-speed electric multiple unit train. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2017. 231(1). P. 3–18. DOI:10.1177/0954409715620534.

12. Zhu H., Yang J., Zhang Y., Feng, X. A novel air spring dynamic model with pneumatic thermodynamics, effective friction and viscoelastic damping. *Journal of Sound and Vibration*. 2017. 408. P. 87-104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.07.015>.

---

Кузишин Андрій Ярославович, доктор філософії, доцент кафедри залізничного транспорту, Інститут механічної інженерії та транспорту національного університету «Львівська політехніка». ORCID 0000-0002-3012-5395. Тел.: +38(098)116-99-47. E-mail: andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua.

Ковальчук Віталій Володимирович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри залізничного транспорту, Інститут механічної інженерії та транспорту національного університету «Львівська політехніка». ORCID 0000-0003-4350-1756. Тел.: +38(097)223-72-43. E-mail: kovalchuk.diit@gmail.com.

Kuzyshyn A., PhD, Associate Professor, Department of Railway transport, Institute of Mechanical Engineering and Transport. Lviv Polytechnic National University. ORCID 0000-0002-3012-5395. Tel.: +38(098)116-99-47. E-mail: andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua.

Kovalchuk V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Railway transport, Institute of Mechanical Engineering and Transport. Lviv Polytechnic National University. ORCID 0000-0003-4350-1756. Tel.: +38(097)223-72-43. E-mail: kovalchuk.diit@gmail.com.

Статтю прийнято 15.05.2024 р.