

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-282-2-70-77>

УДК 629.4.027.31-272.82

ЗАКОНОМІРНОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ РЕСОРИ ШВИДКІСНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ У ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ВНУТРІШНЬОГО ТИСКУ ТА ПРИКЛАДЕНОГО ЗОВНІШНЬОГО СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Кузишин А.Я., Ковальчук В.В.

PATTERNS OF DEFORMATION OF THE PNEUMATIC SPRING OF THE HIGH-SPEED ROLLING STOCK DEPENDING ON THE INTERNAL PRESSURE AND THE APPLIED EXTERNAL STATIC LOAD

Kuzyshyn A. Ya., Kovalchuk V. V.

Основою безпечної експлуатації сучасного швидкісного рухомого складу залізниць є дотримання його динамічних показників та показників безпеки руху. Метою статті є дослідження закономірностей деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори сучасного швидкісного рухомого складу залізниць в залежності від величини прикладеного зовнішнього навантаження та внутрішнього тиску в ресорі. Для досягнення цієї мети було розроблено спеціальну конструкцію стенду та програму експериментальних випробувань пневматичної ресори, яка передбачала вимірювання вертикальних та горизонтальних деформацій із застосуванням сучасних вимірювальних технологій. Зміна величин внутрішнього тиску та прикладеного зовнішнього навантаження відбувалась за допомогою компресора високого тиску та гідродомкрату відповідно. Для вимірювання вертикальних та горизонтальних деформацій застосовувались високочастотні датчики лінійних переміщень. Внутрішній тиск у ресорі змінювався ступеня із кроком 0,5 атм. На основі проведених досліджень побудовано залежності вертикального переміщення кріпильної плити, а також вертикального та горизонтального деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки від величини манометричного тиску у пневматичній ресорі. Встановлено, що збільшення величини манометричного тиску в пневматичній ресорі призводить до зменшення максимальної сили зовнішнього навантаження, що необхідно для деформування ресори на її граничну величину. Відзначено певні узгодження між деформуванням гумо-кордної оболонки у горизонтальному напрямку з різницею між вертикальним переміщенням кріпильної плити та деформуванням нижньої частини гумо-кордної

оболонки у вертикальному напрямку. Наукова новизна отриманих результатів полягає у експериментальному встановленні закономірностей деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках у залежності від зміни тиску в пневматичній ресорі та прикладеного зовнішнього навантаження. Що дозволить більш точно моделювати роботу пневматичної ресори із урахуванням особливостей деформування гумо-кордної оболонки та визначати її динамічні характеристики, що необхідно на етапі проектування сучасного швидкісного рухомого складу залізниць при визначенні безпечних умов його експлуатації.

Ключові слова: пневматична ресора, гумо-кордна оболонка, деформування, сила, внутрішній тиск

Вступ. Безпечна експлуатація залізничного рухомого складу в першу чергу залежить від правильності його проектування відповідно до умов експлуатації. Водночас у процесі проектування рухомого складу досліджуються різноманітні умови роботи конструктивних елементів. Основними конструктивними елементами швидкісного рухомого складу, який експлуатується на залізничному транспорті України є застосування у другій ступені ресорного підвищення пневматичної системи. Конструктивно вона складається з таких основних елементів: пневматичної ресори 1, додаткового резервуару 3 та з'єднувального трубопроводу 2 (рис. 1).

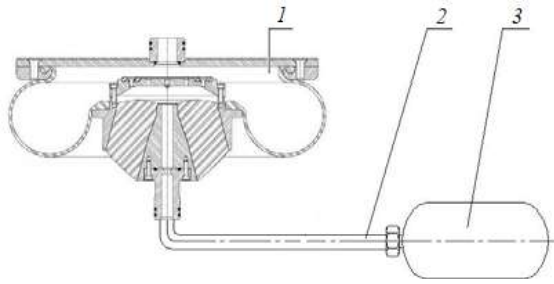


Рис. 1. Схема пневматичної ресори з додатковим резервуаром

Основними характеристиками пневматичної системи ресорного підвішування швидкісного рухомого складу залізниць є жорсткість та коефіцієнт демпфування. Аналіз та систематизація математичних моделей динамічної поведінки пневматичної ресори, оцінка можливості врахування в моделях параметрів, які чинять основний вплив на роботу пневморесори були наведені у роботі [1]. Коефіцієнт демпфування є більше внутрішньою характеристикою, яка залежить від особливостей перетікання повітря між пневматичною ресорою та додатковим резервуаром [2–4]. Жорсткість пневматичної ресори залежить не тільки від стану повітря у пневматичній ресорі, але і від особливостей деформування гумо-кордної оболонки. У роботах [5–8] наведено найбільш поширені механічні моделі пневматичних ресор, які представлені еквівалентними механічними схемами (що складаються з пружин, мас, демпфувальних та інших елементів), значення параметрів яких зазвичай визначають експериментальним шляхом. У роботі [9] авторами проведено теоретичне моделювання та експериментальний аналіз вертикальної жорсткості пневматичної ресори. При цьому, аналітичні моделі структурних параметрів пневматичної ресори встановлено з використанням підходу геометричного аналізу. Проведені експериментальні випробування показали важливість врахування жорсткості гумо-кордної оболонки при дослідженні вертикальної динамічної жорсткості пневматичної ресори. Вплив геометричних параметрів пневматичної ресори на її вертикальну жорсткість також досліджено у роботі [10]. У роботі [11] авторами виведено аналітичну формулу для визначення вертикальної жорсткості пневматичної ресори шляхом врахування швидкості зміни ефективної площі та отримана діаграма залежності коефіцієнта форми від геометричних

параметрів. Однак, точність аналітичної формули погіршується для випадку збільшення об'єму додаткового резервуару. У роботі [12] досліджено нелінійні механічні властивості пневматичної ресори з урахуванням особливостей зміни форми гумо-кордної оболонки пневматичної ресори. У роботі [13] авторами отримано рівняння жорсткості пневматичної ресори в залежності від прогину із урахуванням конфігурації гумо-кордної оболонки.

Отже, проаналізувавши вищенаведені роботи, слід відзначити, що на даний час проведено значну кількість досліджень по визначенню динамічних характеристик пневматичної системи ресорного підвішування. Однак, невирішеним завданням залишається дослідження деформування гумо-кордної оболонки у вертикальному та горизонтальному напрямках, як однієї із складових пневматичної ресори, в залежності від внутрішнього тиску, прикладеного зовнішнього навантаження та особливостей експлуатації пневматичної системи ресорного підвішування.

Метою роботи є експериментальне дослідження закономірностей деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори швидкісного рухомого складу залізниць у вертикальному та горизонтальному напрямках в залежності від величини внутрішнього тиску та прикладеного зовнішнього навантаження.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

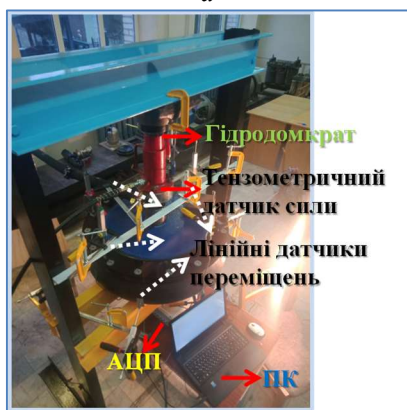
1. Розробити методологію експериментальних досліджень деформування гумо-кордної оболонки при зміні внутрішнього тиску в пневматичній ресорі та прикладеного зовнішнього навантаження.

2. Побудувати залежності вертикального переміщення кріпильної плити пневматичної ресори, вертикального та горизонтального деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки пневматичної ресори в залежності від зміни внутрішнього тиску та зовнішнього навантаження.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження особливостей деформування ресори швидкісного рухомого складу залізниць при зміні внутрішнього тиску та заданні змінного зовнішнього навантаження розроблено спеціальну конструкцію стенду (рис. 2). На рис. 2, *a* наведено складові конструктивної системи ресорного підвішування, а на рис. 2, *b* - навантажувальне та вимірювальне обладнання.



a



b

Рис. 2. Процес експериментальних випробувань пневматичної ресори: *a* – конструктивна схема ресорного підвішування; *b* – навантажувальне та вимірювальне обладнання

Програма експериментальних випробувань пневматичної ресори передбачала вимірювання горизонтальних та вертикальних деформацій ресори при заданні зовнішнього навантаження від гідродомкрата. При цьому випробування проводилося у залежності від внутрішнього тиску у пневматичній ресорі. Величина тиску задавалася компресором високого тиску.

Внутрішній тиск у ресорі змінювався ступеня від 0 до 5 атм., із кроком 0,5 атм. При кожній зміні тиску на 0,5 атм. на ресору прикладалося зовнішнє навантаження від гідродомкрата, що спричиняло деформування ресори. Вимірювання вертикальних та горизонтальних деформацій ресори проводили високочастотними датчиками лінійних переміщень, які зчитувалися аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) та зберігалися у пам'яті персонального комп'ютера (ПК). Величина прикладеного навантаження (у кН) визначалася за допомогою тензометричного датчика сили та висвітлювалася на екрані цифрового перетворювача сили (рис. 3).



Рис. 3. Контроль вертикальних деформацій цифровою лінійкою та величини сили

Задання навантаження від домкрата проводилося до моменту коли вертикальна деформація пневматичної ресори по осі досягала значення 33,0 мм, що відповідає нормальній роботі пневматичної ресори. Перевищення деформацій 33,0 мм призводить до роботи ресори в аварійному режимі. Тому дана величина деформації ресори була обмеженням проведених досліджень при вивченні закономірностей деформування пневматичної ресори. Контроль вертикальної деформації проводився цифровою лінійкою лінійних деформацій (рис. 3).

Слід зазначити, що при прикладанні зовнішнього навантаження від гідралічного домкрата відбувається перетікання повітря у додатковий резервуар. Для фіксування втрати тиску у пневматичній ресорі використано манометр.

Отже, на основі розробленої методології експериментальних досліджень деформування гумо-кордної оболонки отримано залежності вертикального переміщення кріпильної плити, а також вертикального та горизонтального деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки від величини внутрішнього тиску (рис. 4–9).

Аналізуючи отримані залежності встановлено, що при збільшенні манометричного тиску від 0 атм. до 2,0 атм. різниця між вертикальним переміщенням кріпильної плити та деформуванням нижньої частини гумо-кордної оболонки збільшується від 3,9 мм до 12,4 мм. При подальшому збільшенні манометричного тиску від 2,0 атм. до 4,0 атм. різниця становить від 11,6 мм до 12,6 мм. А при збільшенні манометричного тиску від

4,0 атм. до 5,0 атм. спостерігається поступове зменшення вказаної різниці (рис. 10).

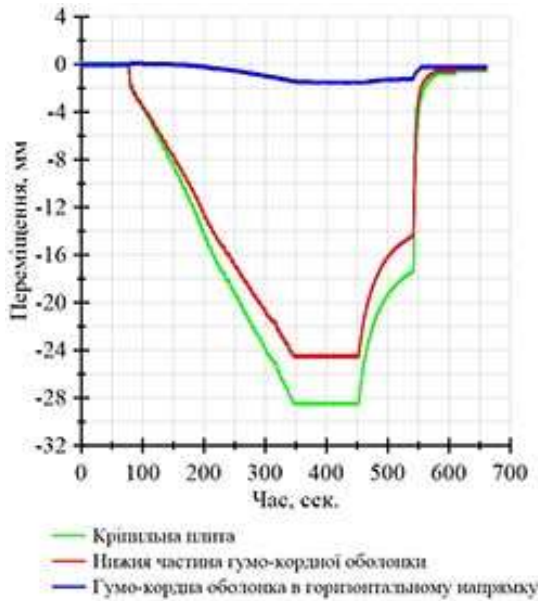


Рис. 4. Вертикальне переміщення кріпильної плити, вертикальне та горизонтальне деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки при атмосферному тиску

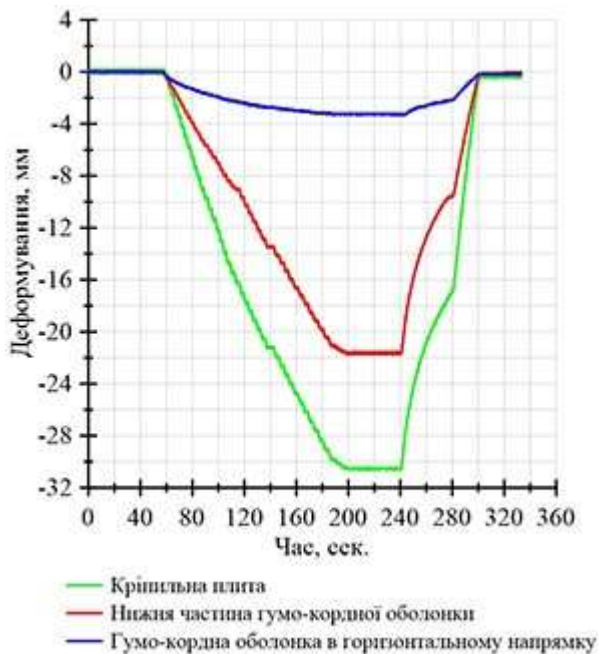


Рис. 5. Вертикальне переміщення кріпильної плити, вертикальне та горизонтальне деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки при манометричному тиску 1,0 атм.

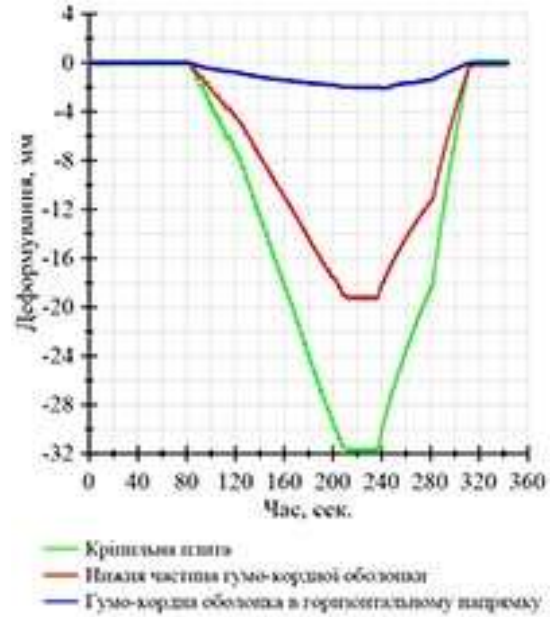


Рис. 6. Вертикальне переміщення кріпильної плити, вертикальне та горизонтальне деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки при манометричному тиску 2,0 атм.

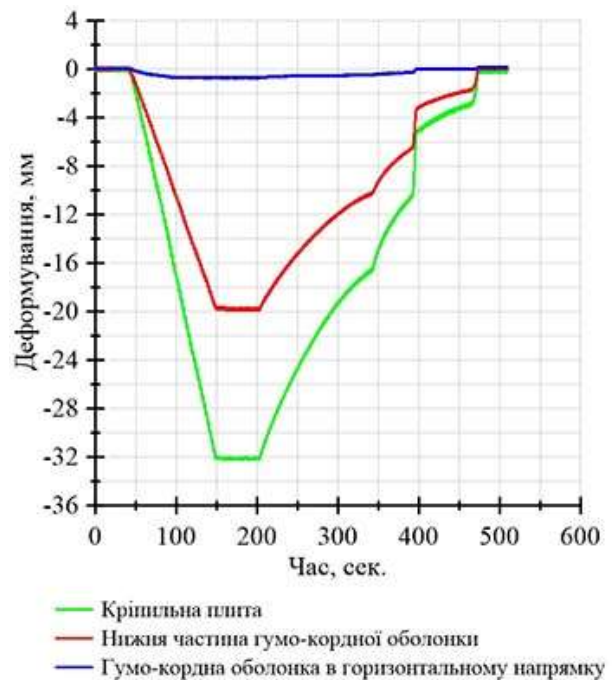


Рис. 7. Вертикальне переміщення кріпильної плити, вертикальне та горизонтальне деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки при манометричному тиску 3,0 атм.

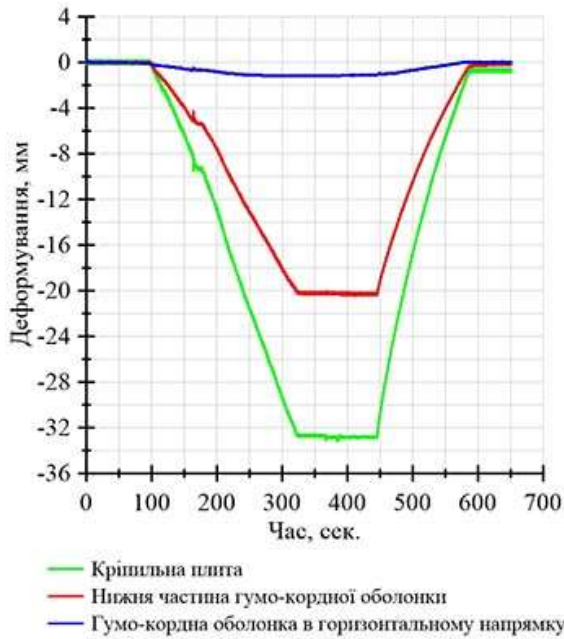


Рис. 8. Вертикальне переміщення кріпильної плити, вертикальне та горизонтальне деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки при манометричному тиску 4,0 атм.

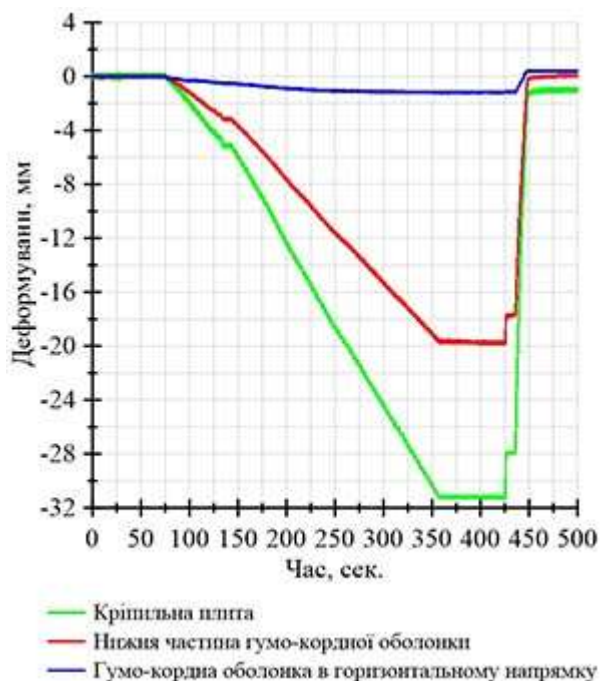


Рис. 9. Вертикальне переміщення кріпильної плити, вертикальне та горизонтальне деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки при манометричному тиску 4,5 атм.

Вищенаведені особливості деформування гумо-кордної оболонки у вертикальному напрямку корилуються із деформуванням в горизонтальному напрямку (рис. 11).

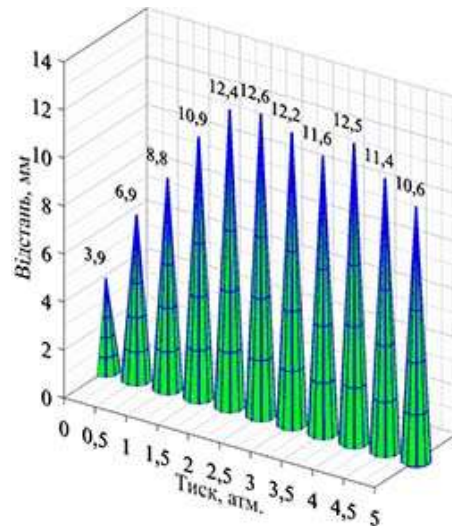


Рис. 10. Різниця між переміщенням кріпильної плити та максимальною величиною деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки

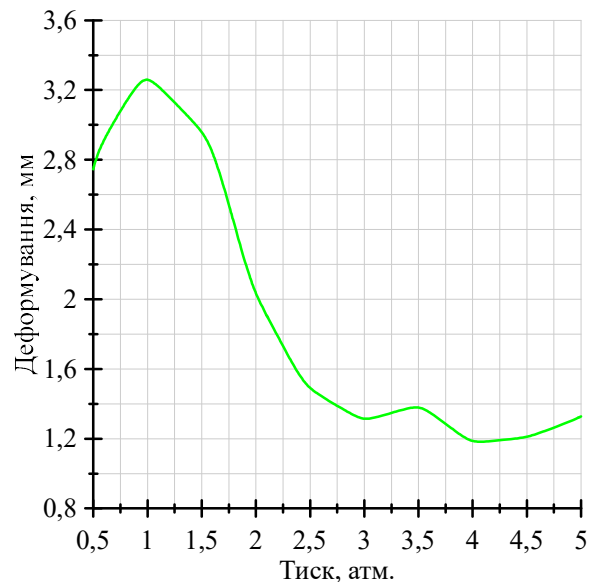


Рис. 11. Деформування гумо-кордної оболонки в горизонтальній площині в залежності від внутрішнього тиску в пневматичній ресорі

Отже, при збільшенні манометричного тиску від 1,0 атм. до 2,0 атм. деформування гумо-кордної оболонки в горизонтальному напрямку приймає максимальне значення 3,26 мм та має спадаючий характер. Цим і пояснюється збільшення різниці між вертикальним переміщенням кріпильної плити та деформуванням нижньої частини гумо-кордної оболонки у цьому діапазоні. При подальшому збільшенні манометричного тиску від 2,0 атм. до 4,0 атм. відбувається зменшення величини горизонтального деформування гумо-кордної оболонки, проте не такої інтенсивності, як у діапазоні від 1,0 атм. до 2,0 атм. Це в свою

чергу сприяє практично сталій різниці між вертикальним переміщенням кріпильної плити та деформуванням нижньої частини гумо-кордної оболонки. Подальше збільшення манометричного тиску в діапазоні від 4,0 до 5,0 атм. призводить до збільшення деформування гумо-кордної оболонки в горизонтальному напрямку та відповідно зменшення вказаної різниці у вертикальному.

Слід відзначити, що зміна внутрішнього тиску у пневматичній ресорі призводить до зміни максимального значення прикладеного зовнішнього навантаження, що необхідно для деформування пневматичної ресори на граничну величину рівну 33 мм (табл.).

Таблиця

Максимальні значення прикладеного зовнішнього навантаження в залежності від внутрішнього тиску в ресорі

Тиск, атм.	Максимальна сила зовнішнього навантаження, кН
0,5	40,40
1,0	29,42
1,5	19,10
2,0	9,54
2,5	5,86
3,0	6,95
3,5	6,67
4,0	7,56
4,5	7,48
5,0	7,91

Аналізуючи дані наведені у табл. 1 встановлено, що збільшення величини манометричного тиску в пневматичній ресорі від 0 атм. до 5,0 атм. призводить до зменшення максимальної сили зовнішнього навантаження в діапазоні від 40,40 кН до 5,86 кН., що необхідно для деформування пневматичної ресори на її граничну величину.

Висновки. Розроблено методологію експериментальних досліджень деформування гумо-кордної оболонки у вертикальному та горизонтальному напрямку при зміні внутрішнього тиску в пневматичній ресорі та прикладеного зовнішнього навантаження. Встановлено, що збільшення величини манометричного тиску в пневматичній ресорі призводить до зменшення максимальної сили зовнішнього навантаження, що необхідно для деформування ресори на її граничну величину при роботі у нормальному режимі 33,0 мм. Відзначено певні узгодження між деформуванням гумо-кордної оболонки у

горизонтальному напрямку з різницею між вертикальним переміщенням кріпильної плити та деформуванням нижньої частини гумо-кордної оболонки у вертикальному напрямку.

В діапазоні манометричного тиску 1,0÷2,0 атм. деформування у горизонтальному напрямку зменшується, проте різниця між вертикальним переміщенням кріпильної плити та деформуванням нижньої частини гумо-кордної оболонки у вертикальному напрямку збільшується. При зміні тиску в діапазоні 2,0÷4,0 атм. деформування в горизонтальній площині продовжує зменшуватись, проте у незначному діапазоні, а вказана різниця практично залишається незмінною. У діапазоні манометричного тиску 4,0÷5,0 атм. відбувається збільшення деформування в горизонтальній площині та відповідно зменшення різниці у вертикальній.

Література

1. 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
2. Docquier N., Fiset P., Jeanmart H. Multiphysics modelling of railway vehicles equipped with pneumatic suspensions. *Vehicle System Dynamics*. 2007. Vol. 45. Iss. 6. P. 505–524. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423110601050848>
3. Kuzyshyn A., Kovalchuk V., Sobolevska Yu. Studying the diagrams "force - deformation" of a pneumatic spring of a modern rolling stock at increased speeds. *MATEC Web of Conferences*. 2024. 390. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202439004006>
4. 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274180>
5. Oda N., Nishimura S. Vibration of air suspension bogies and their design. *Bulletin of JSME*. 1970. Vol. 13. Iss. 55. P. 43–50. DOI: <https://doi.org/10.1299/jsme1958.13.43>
6. Pellegrini C., Gherardi F., Spinelli D., Saporito G., Romani M. Wheel-rail dynamic of DMU IC4 car for DSB: modeling of the secondary air springs and effects on calculation results. *Vehicle System Dynamics*. 2006. Vol. 44. Iss. sup1. P. 433–442. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423110600872960>
7. Aizpun M., Vinolas J., Alonso A. Using the stationary tests of the acceptance process of a rail vehicle to

- identify the vehicle model parameters. *Journal of Rail and Rapid Transit*. 2013. Vol. 228. Iss. 4. P 408–421. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409713478592>
8. Berg M. A three-dimensional airspring model with friction and orifice damping. *Vehicle System Dynamics*. Vol. 33. Iss. sup1. P. 528–539. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063109>
 9. Chen J.-J., Yin Z.-H., Rakheja S., He, J.-H., Guo K.-H. Theoretical modelling and experimental analysis of the vertical stiffness of a convoluted air spring including the effect of the stiffness of the bellows. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2017. Vol. 232. Iss. 4. P. 547–561. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407017704589>
 10. Li X., Li T. Research on vertical stiffness of belted air springs. *Vehicle System Dynamics*. 2013. Vol. 51. Iss. 11. P. 1655–1673. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.819984>
 11. Li X., He Y., Liu W., Wei Y. Research on the vertical stiffness of a rolling lobe air spring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 2015. Vol. 230. Iss. 4. P. 1172–1183. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409715585370>
 12. Qing O., Yin S. The non-linear mechanical properties of an airspring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2001. Vol. 17. Iss. 3. P. 705–711. DOI: <https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1434>
 13. Xu W., He L., Shuai C. Stiffness calculation and dynamic simulation of air spring. *ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (California, 24-28 Sep 2005). California, 2005. P. 1395–1399. DOI: <https://doi.org/10.1115/DETC2005-84338>
 4. 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274180>
 5. Oda N., Nishimura S. Vibration of air suspension bogies and their design. *Bulletin of JSME*. 1970. Vol. 13. Iss. 55. P. 43–50. DOI: <https://doi.org/10.1299/jsme1958.13.43>
 6. Pellegrini C., Gherardi F., Spinelli D., Saporito G., Romani M. Wheel–rail dynamic of DMU IC4 car for DSB: modeling of the secondary air springs and effects on calculation results. *Vehicle System Dynamics*. 2006. Vol. 44. Iss. sup1. P. 433–442. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423110600872960>
 7. Aizpun M., Vinolas J., Alonso A. Using the stationary tests of the acceptance process of a rail vehicle to identify the vehicle model parameters. *Journal of Rail and Rapid Transit*. 2013. Vol. 228. Iss. 4. P 408–421. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409713478592>
 8. Berg M. A three-dimensional airspring model with friction and orifice damping. *Vehicle System Dynamics*. Vol. 33. Iss. sup1. P. 528–539. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063109>
 9. Chen J.-J., Yin Z.-H., Rakheja S., He, J.-H., Guo K.-H. Theoretical modelling and experimental analysis of the vertical stiffness of a convoluted air spring including the effect of the stiffness of the bellows. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2017. Vol. 232. Iss. 4. P. 547–561. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407017704589>
 10. Li X., Li T. Research on vertical stiffness of belted air springs. *Vehicle System Dynamics*. 2013. Vol. 51. Iss. 11. P. 1655–1673. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.819984>
 11. Li X., He Y., Liu W., Wei Y. Research on the vertical stiffness of a rolling lobe air spring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 2015. Vol. 230. Iss. 4. P. 1172–1183. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409715585370>
 12. Qing O., Yin S. The non-linear mechanical properties of an airspring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2001. Vol. 17. Iss. 3. P. 705–711. DOI: <https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1434>
 13. Xu W., He L., Shuai C. Stiffness calculation and dynamic simulation of air spring. *ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (California, 24-28 Sep 2005). California, 2005. P. 1395–1399. DOI: <https://doi.org/10.1115/DETC2005-84338>

References

Kuzyshyn, A. Ya., Kovalchuk, V. V. Patterns of deformation of the pneumatic spring of the high-speed rolling stock depending on the internal pressure and the applied external static load

The basis of safe operation of modern high-speed railway rolling stock is compliance with its dynamic and traffic safety indicators. The purpose of the article is to study the patterns of deformation of the rubber-cord shell of the pneumatic spring of modern high-speed railway rolling stock depending on the magnitude of the applied external load and internal pressure in the spring. To achieve this goal, a special design of the stand and a program of experimental tests of the pneumatic spring were developed, which involved measuring vertical and horizontal deformations using modern measuring technologies. The change in the values of internal pressure and applied external load took place with the help of a high-pressure compressor and a hydraulic jack, respectively. High-frequency linear displacement sensors were used to measure vertical and horizontal deformations. The internal pressure in the spring changed in steps of 0.5 atm. On the basis of the conducted research, the dependence of the vertical movement of the fastening plate, as well as the vertical and horizontal deformation of the lower part of the rubber-cord shell on the value of the manometric pressure in the pneumatic spring was constructed. It was established that an increase in the value of the manometric pressure in the pneumatic spring leads to a decrease in the maximum force of the external load, which is necessary to deform the spring to its limit value. A certain agreement was noted between the deformation of the rubber-cord sheath

in the horizontal direction with the difference between the vertical movement of the fastening plate and the deformation of the lower part of the rubber-cord sheath in the vertical direction. The scientific novelty of the obtained results lies in the experimental establishment of the patterns of deformation of the rubber-cord shell of the pneumatic spring in the vertical and horizontal directions depending on the change in pressure in the pneumatic spring and the applied external load. That will allow to more accurately model the operation of the pneumatic spring taking into account the deformation characteristics of the rubber-cord shell and determine its dynamic characteristics, which is necessary at the stage of designing modern high-speed railway rolling stock when determining the safe conditions of its operation.

Keywords: *pneumatic spring, rubber cord shell, deformation, force, 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 20.04.2024.