

Є. В. Харченко  
А. Р. Біловус

## ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ У МЕХАНІЧНІЙ СИСТЕМІ ТРАМВАЯ ПІД ЧАС ЗІТКНЕННЯ З НЕРУХОМОЮ ПЕРЕШКОДОЮ

Національний університет «Львівська політехніка»

**Анотація.** Розглядається математична модель динамічних процесів, які виникають у механічній системі п'ятисекційного трамвая під час його зіткнення з нерухомою жорсткою перешкодою. Секції трамвая на розрахунковій схемі подано як тверді тіла з податливими частинами (елементами), що зазнають пружно-пластичного деформування. Такі елементи мають: крайні секції спереду і ззаду транспортного засобу, тобто, у місцях, якими трамвай може ударятися об перешкоду; усі секції – у місцях, якими вони з'єднані з сусідніми секціями. Для деформованих частин секцій застосовано білінійні характеристики пружно-пластичного деформування. Відповідно до розглядуваного сценарію, вважаємо, що перед зіткненням з перешкодою усі секції транспортного засобу рухаються прямолінійно і рівномірно. Розрахунок на ударостійкість полягає у визначенні розмірів ушкоджуваних зон життєвого простору трамвая.

На розрахункових прикладах ілюструється вплив маси трамвая, швидкості його руху перед зіткненням, а також характеристик пружно-пластичного деформування секцій на ударостійкість транспортного засобу.

**Ключові слова:** багатосекційний трамвай, динамічний процес зіткнення, математичне моделювання, ударостійкість.

Відповідно до європейського стандарту EN-15227 [3], в процесі проектування, виготовлення і введення в експлуатацію трамваїв, які відносяться до категорії С-IV рейкових транспортних засобів, необхідно проводити оцінку ударостійкості конструкцій кузовів за певними проектними сценаріями зіткнень. До таких сценаріїв відносяться торцевий удар рухомого трамвая по нерухомому, а також удар транспортного засобу об жорстку дорожню перешкоду. У разі зіткнення застосування згаданого стандарту забезпечує захист пасажирів створюваних конструкцій ударостійких транспортних засобів за рахунок збереження структурної цілісності, а також зменшення ризику перевищення уповільнень. Конструкційні рішення та добір характеристик елементів конструкцій, що спрямовані на зменшення наслідків зіткнення, становлять пасивну безпеку транспортного засобу.

Основні труднощі дослідження ударостійкості транспортного засобу пов'язані зі складністю конструкції кузова, який може налічувати декілька тисяч стрижневих та оболонкових елементів, а також з необхідністю урахування пружно-пластичного деформування деталей, що потрапляють у зони зминання секцій. У зв'язку з цим, проблемі аналізу напружено-деформованого стану кузовів транспортних засобів, їх міцності, жорсткості та ударостійкості приділяється значна увага.

Так, у праці [1] оцінюється ударостійкість залізничного пасажирського вагона шляхом моделювання його наїзду на тверду стіну із застосуванням методу скінченних елементів та виробляються практичні рекомендації щодо підсилення металоконструкції вагона. У праці [2] проводяться теоретичні дослідження ударостійкості, міцності і вібраційних властивостей пасажирського вагону, виготовленого із сталі, а також вагону, конструкція якого одержана шляхом заміни сталевих елементів на алюмінієві. Наводиться експериментальна перевірка розрахункових результатів і відзначається висока точність розрахунків, виконаних методом скінченних елементів. Встановлено,

що остаточною алюмінієвою конструкцією, вага якої втричі менша від ваги сталевих, має цілком допустимі характеристики жорсткості. На основі аналогічного підходу у праці [7] оцінюється ударостійкість залізничного транспортного засобу шляхом аналізу його зіткнення з жорсткою стіною та пропонується нова конструкція кабіни водія. У праці [4] розглядається методика оптимізації топології, розмірів і форми ефективної ударостійкої рами вагона з огляду на гармонізацію розподілу енергії поглинання, безпеку пасажирів, комфортабельність транспортного засобу. Основні принципи концепції пасивного захисту швидкісних пасажирських поїздів залізниць колії 1520 мм в умовах аварійного зіткнення розглядаються у праці [6].

У праці [8] за допомогою методу скінченних елементів розроблено моделі жорсткого бар'єрного зіткнення транспортних засобів, виготовлених із типових матеріалів: вуглецевої сталі, нержавіючої сталі та алюмінієвого сплаву. Такі матеріали використовуються у конструкціях кузовів вагонів метро. Порівнюються різні реакції трьох матеріалів під час зіткнення. Відповідно до характеристик потоків поглинання енергії, швидкості, деформації та сили зіткнення кожного транспортного засобу запропоновано співвідношення між коефіцієнтом поглинання енергії кузовом та коефіцієнтом поглинання енергії його ключовими компонентами. Аналізуються причини деформування ключових компонентів. Шляхом визначення характерних параметрів, що описують динамічну жорсткість транспортного засобу, створено модель лобового зіткнення поїзда метро з перешкодою із використанням зосереджених параметрів. Зазначена модель забезпечує простий та ефективний концептуальний метод проектування безпеки залізничного поїзда.

Актуальні питання теорії непружних конструкцій викладені у книзі [5].

У даній доповіді розглядається математична модель динамічних процесів, які виникають у механічній системі п'ятисекційного трамвая під час його зіткнення з нерухомою жорсткою перешкодою. Секції трамвая на розрахунковій схемі подано як тверді тіла з податливими частинами (елементами), що зазнають пружно-пластичного деформування. Такі елементи мають: крайні секції спереду і ззаду транспортного засобу, тобто, у місцях, якими трамвай може ударитися об перешкоду; усі секції – у місцях, якими вони з'єднані з сусідніми секціями. Для деформованих частин секцій застосовано білінійні характеристики пружно-пластичного деформування. Відповідно до розглядуваного сценарію, вважаємо, що перед зіткненням з перешкодою усі секції транспортного засобу рухаються прямолінійно і рівномірно. Розрахунок на ударостійкість полягає у визначенні розмірів ушкоджуваних зон життєвого простору трамвая.

На розрахункових прикладах ілюструється вплив маси трамвая, швидкості його руху перед зіткненням, а також характеристик пружно-пластичного деформування секцій на ударостійкість транспортного засобу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Baykasoglu C, Sunbuloglu E, Bozdag S E, Aruk F, Toprak T & Mungan A (2011) Railroad passenger car collision analysis and modifications for improved crashworthiness, *International Journal of Crashworthiness*, 16:3, 319-329, DOI: 10.1080/13588265.2011.566475
2. Baykasoglu C, Sunbuloglu E, Bozdag S E, Aruk F, Toprak T & Mungan A (2012) Crash and structural analyses of an aluminium railroad passenger car, *International Journal of Crashworthiness*, 17:5, 519-528, DOI:10.1080/13588265.2012.690591
3. British Standards Institution. BS EN 15227. Railway Applications. Crashworthiness Requirements for Rail Vehicles. 2022.
4. Hosseini-Tehrani P & Bayat V (2011) Study on crashworthiness of wagon's frame under frontal impact, *International Journal of Crashworthiness*, 16:1, 25-39, DOI: 10.1080/13588265.2010.499698
5. Саймондс П. С. Динамика неупругих конструкцій. М.: Мир. 1982. 224 р. [Dynamics of nonelastic constructions. Moscow. Mir].

6. Sobolevska M. & Telychko I. Passive safety of high-speed passenger trains at accident collisions on 1520 mm gauge railways. *Transport problems*. 2017;12(1):51-62. Doi:10.20858/tp.201712.1.5
7. Xue X, Smith R A & Schmid F (2005) Analysis of crush behaviours of a rail cab car and structural modifications for improved crashworthiness, *International Journal of Crashworthiness*, 10:2, 125-136, DOI:10.1533/ijcr.2005.0332
8. Zhu T, Xiao S-N, Hu G-Z, Yang G-W, Yang C. Crashworthiness analysis of the structure of metro vehicles constructed from typical materials and the lumped parameter model of frontal impact. *Transport*. 2019;34(1):75–88. doi:10.3846/transport.2019.7552

*Харченко Євген Валентинович*, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Опір матеріалів та будівельна механіка», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, e-mail: [yevhen.v.kharchenko@lpnu.ua](mailto:yevhen.v.kharchenko@lpnu.ua);

*Біловус Андрій Романович*, аспірант, Інститут механічної інженерії та транспорту, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, e-mail: [andrii.r.bilovus@lpnu.ua](mailto:andrii.r.bilovus@lpnu.ua).

## DYNAMIC PROCESSES IN THE MECHANICAL SYSTEM OF A TRAM DURING COLLISION WITH A FIXED OBSTACLE

**Abstract.** *A mathematical model of dynamic processes that occur in a five-section tram mechanical system during its collision with a stationary rigid obstacle is considered. The tram sections are represented as rigid bodies with flexible parts (elements) that undergo elastic-plastic deformation in the computational scheme. These elements include the end sections at the front and rear of the vehicle, that is., the areas where the tram may collide with the obstacle, and all the sections where they are connected to neighboring sections. Bilinear characteristics of elastic-plastic deformation are applied to the deformed parts of the sections. According to the considered scenario, it is assumed that all sections of the vehicle move in a straight and uniform motion before the collision with the obstacle. The calculation for impact resistance involves determining the dimensions of the damaged zones in the tram's living space.*

*The influence of the tram's mass, its velocity before the collision, as well as the characteristics of elastic-plastic deformation of the sections on the impact resistance of the vehicle, is illustrated through computational examples.*

**Keywords:** *dynamic collision process, impact resistance, mathematical modeling, multi-section tram.*

*Kharchenko Yevhen*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Strength of Materials and Structural Mechanics Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, e-mail: [yevhen.v.kharchenko@lpnu.ua](mailto:yevhen.v.kharchenko@lpnu.ua);

*Bilovus Andriy*, postgraduate, Institute of Mechanical Engineering and Transport, Lviv Polytechnic National University, Lviv, e-mail: [andrii.r.bilovus@lpnu.ua](mailto:andrii.r.bilovus@lpnu.ua).