

М. Б. СОБОЛЕВСЬКА, Д. В. ГОРОБЕЦЬ, С. А. СИРОТА

ВИЗНАЧЕННЯ СИЛОВОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗАЄМОДІЇ СИСТЕМИ ПАСИВНОЇ БЕЗПЕКИ ГОЛОВНОГО ВАГОНА З ВЕЛИКИМ ТРАНСПОРТНИМ ЗАСОБОМ ПРИ ЗІТКНЕННІ*Інститут технічної механіки**Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: sobmb@i.ua*

Одним з пріоритетів Національної економічної стратегії України на період до 2030 року є розвиток транспортної галузі, зокрема оновлення рухомого складу, впровадження високошвидкісного пасажирського залізничного транспорту, підвищення рівня безпеки залізничних перевезень. Оновлення вітчизняного моторвагонного рухомого складу повинно відбуватися у відповідності до гармонізованих з європейськими нових вітчизняних стандартів, серед яких слід зазначити ДСТУ EN 15227, що регламентує пасивну безпеку пасажирського поїзда при аварійних зіткненнях з різними перешкодами. Нові конструкції вагонів мають бути обладнані не тільки ефективними сучасними гальмівними засобами для попередження аварійних зіткнень, але й системами пасивної безпеки, до складу яких входять пристрої поглинання енергії. Основним завданням цих пристроїв є зниження до допустимого рівня позовжних зусиль у міжвагонних з'єднаннях та прискорень вагонів при визначених стандартом ДСТУ EN 15227 трьох сценаріях зіткнень. У відділі статистичної динаміки і динаміки багатовимірних механічних систем Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України розроблено концепцію пасивного захисту вітчизняних швидкісних пасажирських поїздів при аварійних зіткненнях, що відповідають сценаріям стандарту ДСТУ EN 15227, пропозиції щодо пасивного захисту головного вагона моторвагонного поїзда, а також стільникові конструкції пристроїв поглинання енергії нижнього (ППЕ 1) і верхнього (ППЕ ВР) рівнів, які інтегруються в конструкцію лобової частини головного вагона та призначаються для гасіння основної частини енергії удару при лобових зіткненнях поїзда з перешкодами. В статті розглянуто сценарій 3 ДСТУ EN 15227: зіткнення еталонного моторвагонного поїзда зі швидкістю 110 км/год на залізничному переїзді з великим транспортним засобом масою 15 т, який моделюється великогабаритною перешкодою, що може деформуватися (ВПД). Метою статті є визначення силової характеристики взаємодії пристроїв поглинання енергії, розташованих в лобовій частині головного вагона, з великим транспортним засобом при зіткненні для подальшої оцінки відповідності запропонованого пасивного захисту нормативним вимогам. Побудовано скінченно-елементні моделі для аналізу пластичного деформування елементів систем "ППЕ 1 – ВПД", "ППЕ ВР – ВПД" та "ППЕ 1 – ППЕ ВР – ВПД" при зіткненні з урахуванням геометричної та фізичної нелінійностей, динамічного зміцнення сталі в залежності від швидкості удару, змінної контактної взаємодії елементів розглянутої системи. В результаті виконаних досліджень визначено силові характеристики взаємодії пристроїв поглинання енергії з перешкодою, а також сумарну характеристику залежності контактної зусилля між двома пристроями нижнього та двома пристроями верхнього рівня від переміщення центра мас перешкоди при зіткненні. Запропоновані математичні моделі, отримані силові характеристики можуть бути використані при дослідженні динаміки зіткнення еталонного моторвагонного поїзда з великим транспортним засобом з метою оцінки відповідності пасивного захисту вітчизняного головного вагона, що проєктується, вимогам ДСТУ EN 15227.

Ключові слова: моторвагонний поїзд, безпека руху, аварійне зіткнення, головний вагон, система пасивної безпеки, пристрої поглинання енергії, великий транспортний засіб.

One of the priorities of the National Economic Strategy of Ukraine for the Period up to 2030 is the development of the transport sector, in particular railway vehicle renewal, the introduction of high-speed railway passenger transport, and railway traffic safety improvement. The home motor-car trains must be renewed in compliance with new home standards harmonized with European ones, among which one should mention the Ukrainian State Standard DSTU EN 15227, which specifies the passive safety of a passenger train in its emergency collisions with different obstacles. New car designs must provide not only effective up-to-date braking systems to prevent emergency collisions, but also passive safety systems with energy-absorbing devices. The main purpose of these devices is to reduce the longitudinal forces in the intercar connections and the car accelerations to an acceptable level for the three collision scenarios specified in the DSTU EN 15227. The Department of Statistical Dynamics and Multidimensional Mechanical Systems Dynamics, Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, developed a passive protection concept for home high-speed passenger trains in emergency collisions by the DSTU EN 15227 scenarios, proposals on the passive protection of a motor-car train head car, and honeycomb designs of lower- and upper-level energy-absorbing devices (EAD 1 and UL EAD, respectively), which are integrated into the head car front part and serve to damp the major part of the impact energy in front collisions with obstacles. This paper considers DSTU EN 15227 Scenario 3: a collision of a reference motor-car train at a speed of 110 km/h at a railway crossing with a large 15 t road vehicle, which is simulated as a large-size deformable obstacle (LSDO). The aim of the paper is to determine the force characteristic of the interaction of energy-absorbing devices mounted on the head car front part with a large road vehicle in a collision to assess the compliance of the proposed passive protection with the normative requirements. Finite-element models were constructed to analyze the plastic deformation of the elements of the EAD 1 – LSDO, UL EAD – LSDO, and EAD 1 – UL EAD – LSDO systems in a collision with

© М. Б. Соболевська, Д. В. Горобець, С. А. Сирота, 2021

account for geometric and physical nonlinearities, steel dynamic hardening as a function of the impact speed, and varying contact interaction between the elements of the systems considered. The studies conducted made it possible to determine the force characteristics of energy-absorbing device – obstacle interaction and the total characteristic of the contact force between two lower-level devices and two upper-level ones as a function of the obstacle center of mass displacement in a collision. The proposed mathematical models and the calculated force characteristics may be used in the study of the dynamics of a reference motor-car train – large road vehicle collision with the aim to assess the compliance of the passive protection of the home head car under design with the DSTU EN 15227 requirements.

Keywords: *motor-car train, traffic safety, emergency collision, head car, passive safety system, energy-absorbing devices, large vehicle.*

Вступ. Одним з пріоритетів Національної економічної стратегії України на період до 2030 року [1] є розвиток транспортної галузі, зокрема оновлення рухомого складу, впровадження високошвидкісного пасажирського залізничного транспорту, підвищення рівня безпеки залізничних перевезень. Оновлення вітчизняного моторвагонного рухомого складу повинно відбуватися у відповідності до нових вітчизняних стандартів, гармонізованих з європейськими. Серед таких стандартів слід зазначити ДСТУ EN 12663 [2], який містить вимоги щодо міцності конструкції залізничного екіпажа при експлуатаційних навантаженнях, та ДСТУ EN 15227 [3], який регламентує пасивну безпеку пасажирського поїзда при аварійних зіткненнях з різними перешкодами. Нові конструкції вагонів моторвагонного поїзда повинні бути обладнані не тільки ефективними сучасними гальмівними засобами для попередження аварійних зіткнень, але й системою пасивної безпеки (СПБ), призначенням якої є збереження життя і здоров'я пасажирів та персоналу поїзда, зменшення пошкоджень рухомого складу та мінімізація важких наслідків аварійних зіткнень. До складу СПБ входять пристрої поглинання енергії (ППЕ), основним завданням яких є зниження до допустимого рівня поздовжніх зусиль у міжвагонних з'єднаннях та прискорень вагонів при визначених стандартом ДСТУ EN 15227 трьох сценаріях зіткнень. Особливої уваги заслуговує розробка пристроїв поглинання енергії, які інтегруються в конструкцію лобової частини головного вагона та призначаються для гасіння основної частини енергії удару при лобових зіткненнях поїзда з перешкодами.

Лідерами в розробці систем пасивної безпеки головних вагонів згідно з вимогами європейського стандарту EN 15227, ідентичного ДСТУ EN 15227, є Німеччина, Франція, Швейцарія, Австрія, Японія, Південна Корея. Існуючі СПБ головного вагона є, як правило, дворівневими і складаються з ППЕ нижнього рівня, які розташовуються спереду і ззаду вагона на рівні зчпного пристрою, та з ППЕ верхнього рівня, що інтегруються в лобову підвіконну частину вище рівня зчпного пристрою [4 – 10].

У відділі статистичної динаміки і динаміки багатовимірних механічних систем Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і ДКАУ) розроблено концепцію пасивного захисту вітчизняних швидкісних пасажирських поїздів при аварійних зіткненнях, що відповідають сценаріям стандарту ДСТУ EN 15227 [11], пропозиції щодо пасивного захисту вітчизняного головного вагона моторвагонного поїзда, а також стільникові конструкції пристроїв поглинання енергії нижнього (ППЕ 1) і верхнього (ППЕ ВР) рівнів [12] для лобової частини головного вагона (рис. 1).

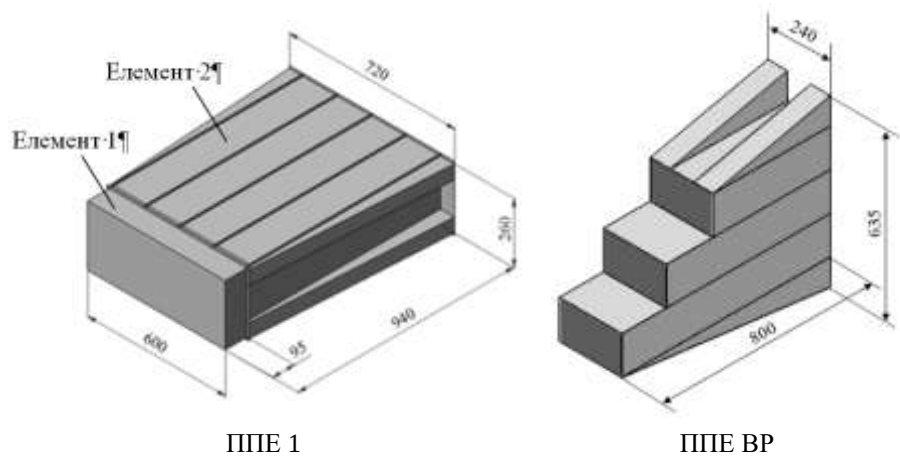


Рис. 1 – Пристрої поглинання енергії для лобової частини головного вагона

Для оцінки відповідності запропонованого пасивного захисту головного вагона критеріям ДСТУ EN 15227 розроблено математичні моделі динаміки зіткнення ідентичних еталонних моторвагонних поїздів (сценарій 1) [13] та зіткнення еталонного поїзда з вантажним вагоном (сценарій 2) [14]. На основі аналізу європейського досвіду з пасивного захисту головного вагона побудовано тривимірну геометричну модель лобової частини головного вагона для вітчизняних залізниць з розташованими в ній пристроями поглинання енергії ППЕ 1 і ППЕ ВР.

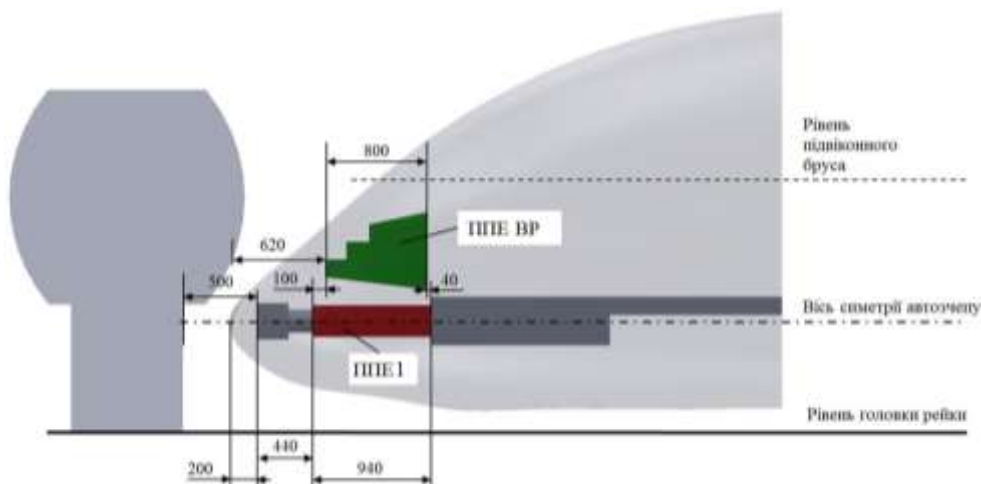
Постановка задачі. В статті розглядається сценарій 3 ДСТУ EN 15227: зіткнення еталонного моторвагонного поїзда зі швидкістю 110 км/год на залізничному переїзді з великогабаритним транспортним засобом масою 15 т. Запропонований пасивний захист головного вагона повинен відповідати критеріям ДСТУ EN 15227 для сценарію 3: середнє значення поздовжнього прискорення в зонах безпеки, призначених для виживання та евакуації людей, не може перевищувати 7,5 g, а силова конструкція кузова вагона при поздовжньому ударному навантаженні не повинна втрачати загальної несучої здатності. Для оцінки відповідності пасивного захисту означеним критеріям на основі математичної моделі зіткнення ідентичних моторвагонних поїздів розроблено математичну модель зіткнення еталонного поїзда з великим транспортним засобом, яка враховує силову характеристику взаємодії перешкоди з розташованими в лобовій частині головного вагона пристроями поглинання енергії та роботу конструкції кузова вагона при зіткненні.

Метою статті є визначення силової характеристики взаємодії пристроїв поглинання енергії, розташованих в лобовій частині головного вагона, з великим транспортним засобом при зіткненні.

Схему розташування лобової частини головного вагона, обладнаного двома ППЕ 1 і двома ППЕ ВР, та перешкоди згідно з умовами сценарію 3 показано на рис. 2. Передбачається, що пристрої поглинання енергії верхнього та нижнього рівнів розташовані симетрично відносно центральної вертикально-поперечної площини симетрії лобової частини головного вагона.

Передбачалося, що захисні пристрої є нерухомими, а рухається перешкода, оскільки в статті визначаються характеристики взаємодії пристроїв по-

глинання енергії з перешкодою в процесі пластичного деформування об'єктів, що співударяються.



Всі розміри наведено в міліметрах.

Рис. 2 – Схема розташування лобової частини головного вагона, обладнаного двома ППЕ 1 і двома ППЕ ВР, та перешкоди згідно з умовами сценарію 3

Згідно з розробленими пропозиціями для пасивного захисту вітчизняного головного вагона [12] прийнято такі допустимі значення динамічних навантажень (при яких виникають пластичні деформації в елементах конструкцій) при зіткненнях згідно зі сценаріями ДСТУ 15227: 4,2 МН для рами головного вагона та 0,7 МН для лобової стінки кабіни машиніста.

При розв'язанні поставленої задачі використано розроблену згідно з вимогами ДСТУ EN 15227 модель великогабаритного транспортного засобу як перешкоди, що може деформуватися (ВПД) [15].

Скінченно-елементне моделювання взаємодії головного вагона з великим транспортним засобом при зіткненні. Для визначення силової характеристики взаємодії головного вагона з перешкодою при зіткненні згідно з умовами сценарію 3 спочатку розглянуто процес взаємодії одного пристрою поглинання енергії нижнього рівня ППЕ 1 з половиною перешкоди ВПД, відсіченою її центральною вертикально-поперечною площиною симетрії, при зіткненні.

Побудовано скінченно-елементну модель 1 для аналізу деформування елементів системи “ППЕ 1 – ВПД” при зіткненні з урахуванням геометричної та фізичної нелінійностей, динамічного зміцнення сталі в залежності від швидкості удару; змінної контактної взаємодії елементів розглянутої системи. При цьому використано досвід та методику дослідження напружено-деформованого стану елементів конструкцій локомотивів, обладнаних засобами пасивного захисту, при аварійних зіткненнях [16].

Скінченно-елементну схему системи “ППЕ 1 – ВПД” показано на рис. 3. Жорстке закріплення мають вузли на задньому торцевому перетині конструкції ППЕ 1. Скінченно-елементна схема системи “ППЕ 1 – ВПД” складається з 58819 вузлів і 248954 елементів, з яких схема ППЕ 1 містить 17119 вузлів і 18115 елементів. Характерний розмір скінченного елемента при побудові цієї схеми та наступних становить від 15 мм до 20 мм.

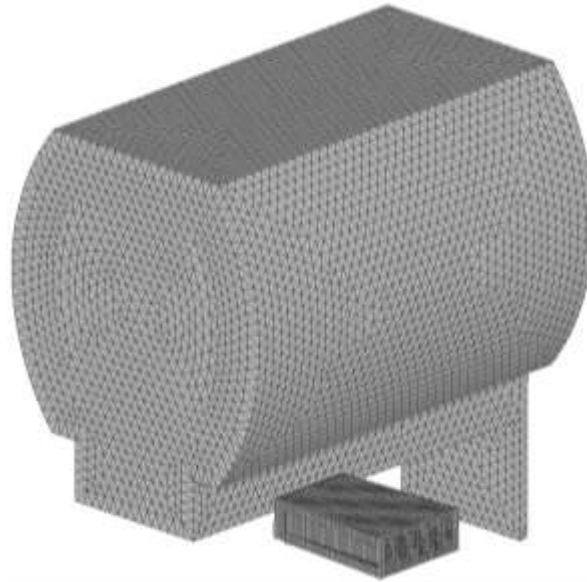
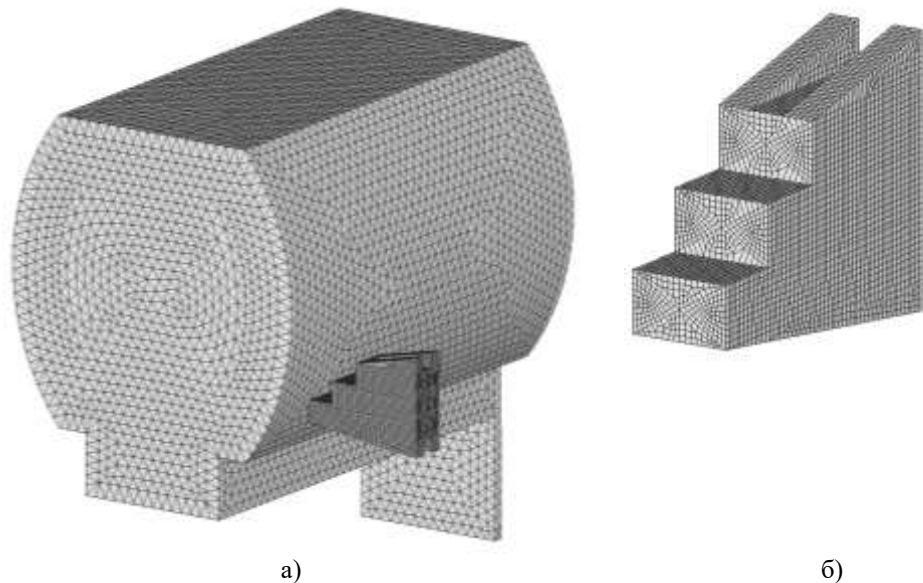


Рис. 3 – Скінченно-елементна схема системи “ППЕ 1 – ВПД”

Окремо розглянуто процес взаємодії одного пристрою поглинання енергії верхнього рівня (ППЕ ВР) з половиною перешкоди ВПД, відсіченою її центральною вертикально-поперечною площиною симетрії, при зіткненні зі швидкістю 110 км/год. Розроблено скінченно-елементну модель 2 для аналізу нелінійного деформування елементів системи “ППЕ ВР – ВПД” при зіткненні. Побудована скінченно-елементна схема системи “ППЕ ВР – ВПД” містить 54979 вузлів і 244913 елементів, з яких ППЕ ВР – 13279 вузлів і 14074 елемента. Жорстке закріплення мають вузли на задньому торцевому перетині конструкції ППЕ ВР. Скінченно-елементні схеми системи “ППЕ ВР – ВПД” та ППЕ ВР наведено на рис. 4.



а) – скінченно-елементна схема системи “ППЕ ВР – ВПД”;
б) – скінченно-елементна схема ППЕ ВР

Рис. 4 – Скінченно-елементні схеми системи “ППЕ ВР – ВПД” та ППЕ ВР

Розглянуто також процес взаємодії одного пристрою поглинання енергії нижнього рівня ППЕ 1 та одного пристрою поглинання енергії верхнього рівня (ППЕ ВР) з половиною перешкоди ВПД, відсіченою її центральною вертикально-поперечною площиною симетрії, при їх зіткненні зі швидкістю 110 км/год. Розроблено скінченно-елементну модель 3 для визначення силової характеристики взаємодії елементів пасивного захисту (верхнього та нижнього рівнів) головного вагона з ВПД при зіткненні. Скінченно-елементну схему системи “ППЕ 1 – ППЕ ВР – ВПД” наведено на рис. 5.

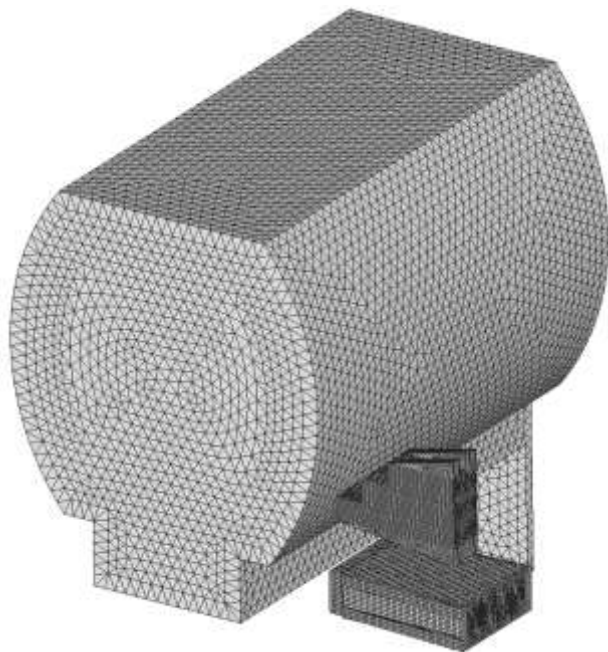


Рис. 5 – Скінченно-елементна схема системи “ППЕ 1 – ППЕ ВР – ВПД”

Побудована скінченно-елементна схема містить 72098 вузлів і 263028 елементів, з яких захисні пристрої – 30398 вузлів і 32189 елементів. Жорстке закріплення мають вузли на задніх торцевих перетинах конструкцій ППЕ 1 та ППЕ ВР.

Результати досліджень. За допомогою побудованої скінченно-елементної моделі 1 зроблено аналіз деформування елементів системи “ППЕ 1 – ВПД” при зіткненні.

На рис. 6 приведено залежність контактної сили між ВПД та ППЕ 1 від переміщень u_b при ударі.

На рис. 7 показано фрагменти взаємодії ППЕ 1 при різних значеннях позовжнього переміщення u_b центра мас ВПД.

Встановлено, що основне енергопоглинання відбувається за рахунок деформації перешкоди. Максимальне контактне зусилля при $u_b \leq 1,5$ м не перевищує 1,5 МН, а енергопоглинання дорівнює 0,95 МДж.

За рахунок деформування системи “два ППЕ 1 – ВПД” при $u_b \leq 1,5$ м може бути поглинена енергія 1,9 МДж. Контактне зусилля при цьому дорівнює 3,0 МН і не перевищує допустимого значення (4,2 МН) позовжньої сили, при якій виникають пластичні деформації в рамі кузова головного вагона.

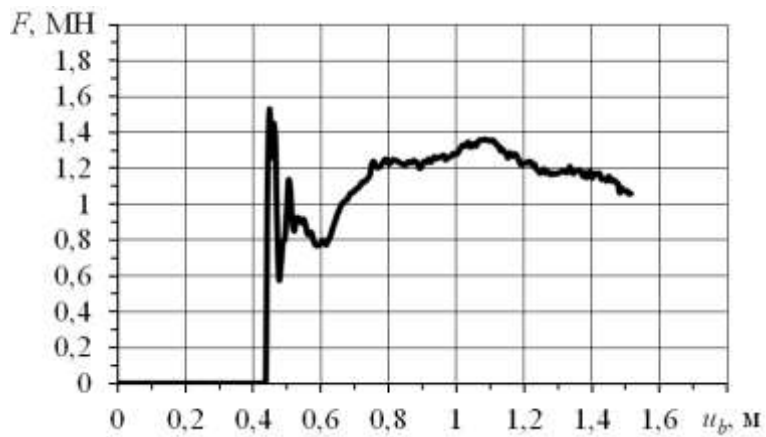


Рис. 6 – Залежність контактної сили F між ВПД та ППЕ 1 від переміщень u_b при зіткненні

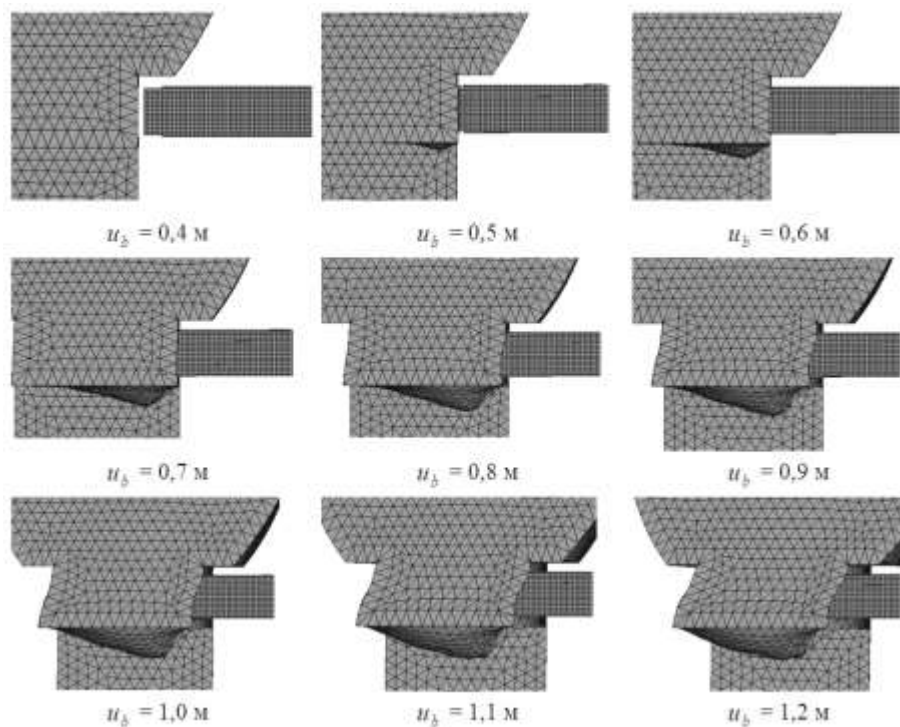


Рис. 7 – Фрагменти взаємодії ППЕ 1 при різних значеннях позовжнього переміщення u_b центра мас ВПД

За допомогою розробленої скінченно-елементної моделі 2 виконано дослідження нелінійного деформування елементів системи “ППЕ ВР – ВПД” при зіткненні. Визначену залежність контактної сили F між перешкодою та ППЕ ВР від переміщення u_b центра мас ВПД показано на рис. 8.

Деформації ППЕ ВР при різних значеннях позовжнього переміщення u_b приведено на рис. 9.

При позовжньому переміщенні центра мас ВПД $u_b = 0,73 \text{ м}$ за рахунок деформування елементів системи “ППЕ ВР – ВПД” поглинається енергія 0,16 МДж, а контактне зусилля дорівнює 0,35 МН.

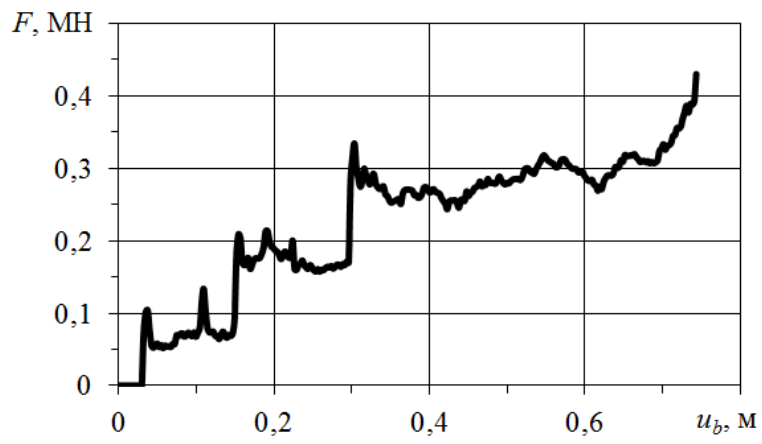


Рис. 8 – Залежність контактної сили F між ВПД та ППЕ ВР від переміщень u_b центра мас ВПД

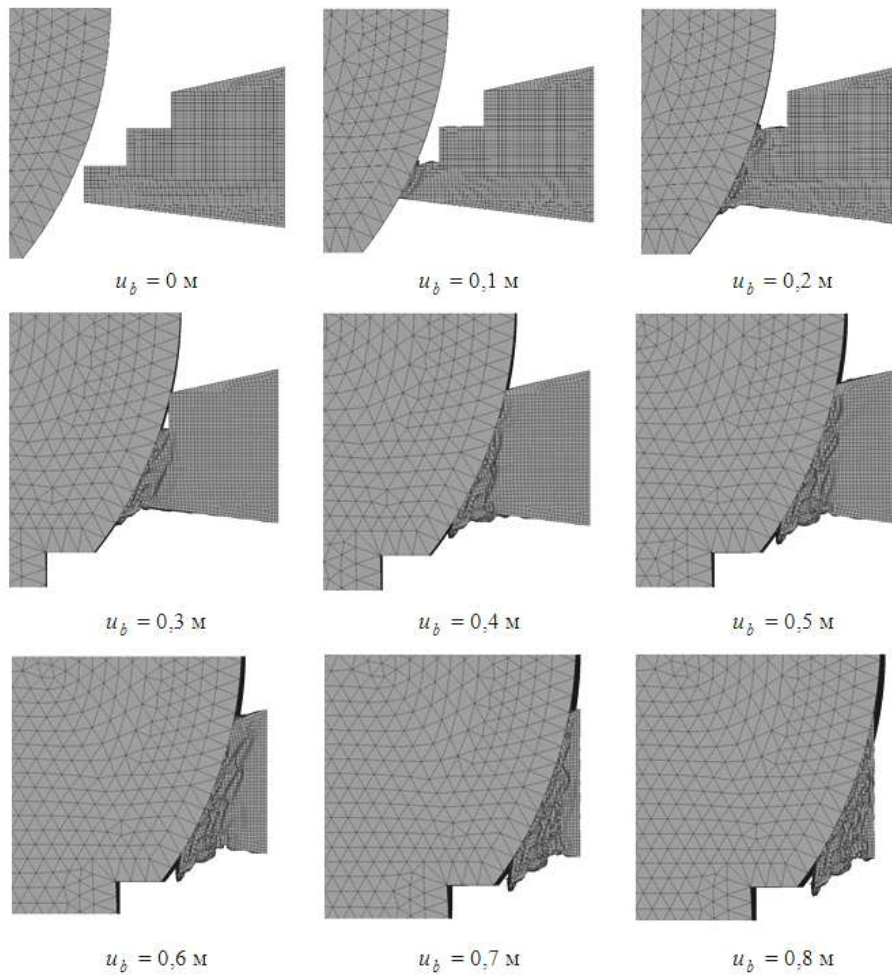


Рис. 9 – Деформації ППЕ ВР при різних значеннях поздовжнього переміщення u_b центра мас ВПД

За рахунок деформування системи “два ППЕ ВР – ВПД” при $u_b = 0,73$ м може бути поглинена енергія 0,32 МДж. Контактне зусилля при цьому дорівнює 0,7 МН (не перевищує допустимого рівня).

За допомогою розробленої скінченно-елементної моделі 3 виконано дослідження нелінійного деформування елементів системи “ППЕ 1 – ППЕ ВР – ВПД”. На рис. 10 показано деформації пристроїв поглинання енергії верхнього і нижнього рівнів та ВПД при різних значеннях поздовжнього переміщення u_b центра мас ВПД.

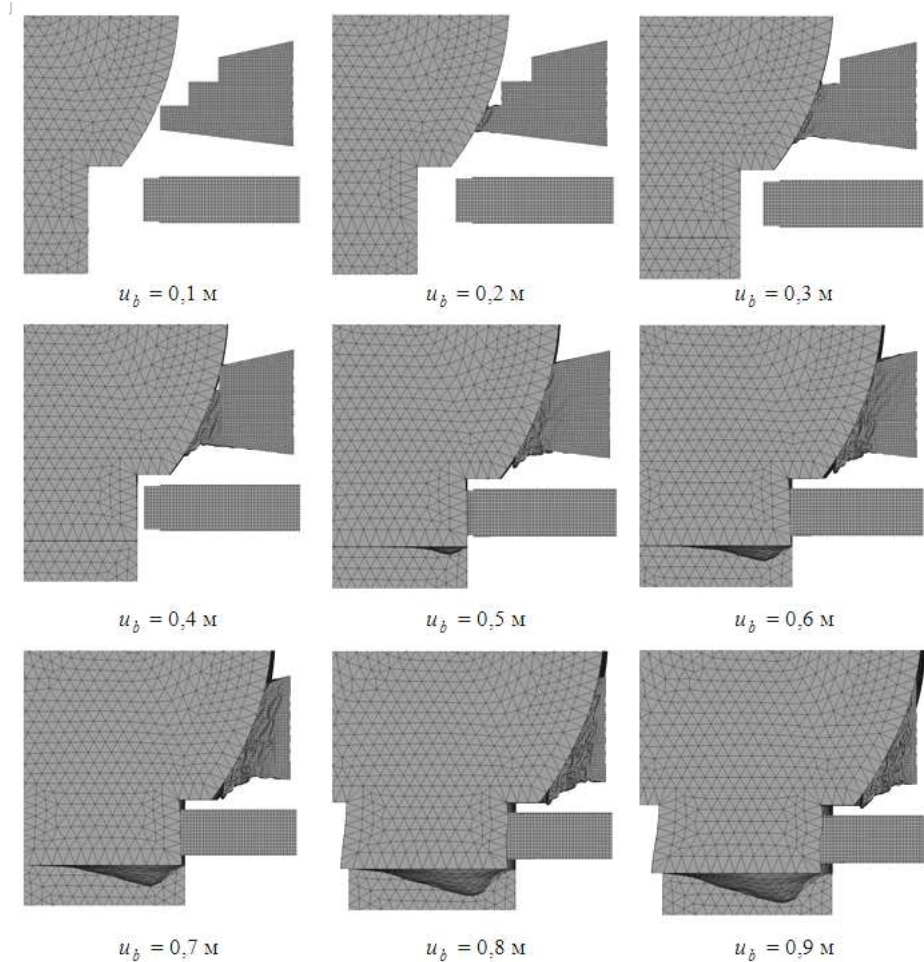


Рис. 10 – Деформації в системі “ППЕ 1 – ППЕ ВР – ВПД” при різних значеннях поздовжнього переміщення центра мас перешкоди u_b

Як видно з рис. 10, спочатку відбувається контакт ВПД з пристроєм верхнього рівня (ППЕ ВР), деформація ППЕ ВР, далі в результаті контакту ВПД з ППЕ 1 відбувається деформація елемента 1 ППЕ 1, а потім нижньої частини ВПД. Основне енергопоглинання відбувається за рахунок деформації ВПД пристроєм ППЕ 1. З урахуванням того, що взаємодія ВПД з ППЕ ВР починається при $u_b = 0,12$ м, поздовжнє переміщення центра мас ВПД після вибору довжини ППЕ ВР дорівнює $u_b = 0,94$ м.

Залежність контактного зусилля між ВПД та елементами пасивного захисту головного вагона (одного пристрою поглинання енергії нижнього рівня

ППЕ 1 та одного пристрою поглинання енергії верхнього рівня (ППЕ ВР) з половиною перешкоди ВПД) від переміщень u_b при зіткненні згідно з умовами сценарію 3 ДСТУ EN 15227 приведено на рис. 11. При побудові цієї діаграми застосовано фільтр нижніх частот [17] з частотою зрізу 180 Гц відповідно до вимог ДСТУ EN 15227.

При поздовжньому переміщенні $u_b = 0,94$ м за рахунок деформування елементів розглянутої системи “ППЕ 1 – ППЕ ВР – ВПД” поглинається енергія 0,64 МДж, а контактне зусилля (з фільтрацією) дорівнює 1,72 МН. За рахунок деформування ВПД та всіх ППЕ, встановлених в лобовій частині головного вагона (схема 1) при ударних навантаженнях, що виникають при зіткненні згідно з умовами сценарію 3, може бути поглинена енергія 1,28 МДж при максимальному рівні контактного зусилля 3,44 МН.

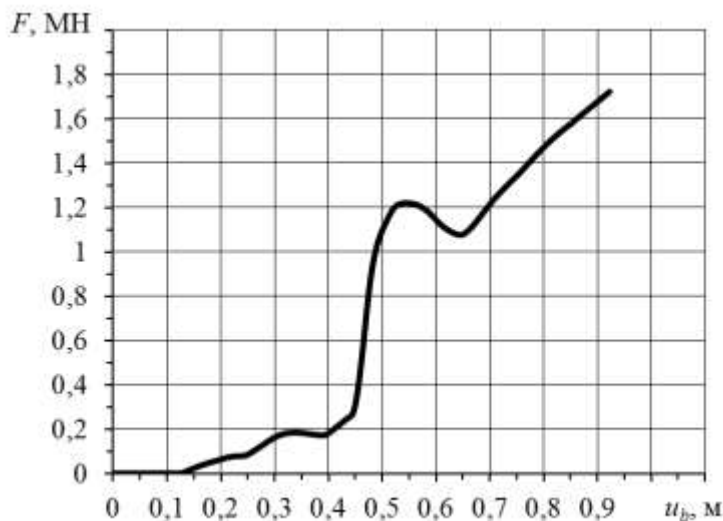


Рис. 11 – Залежність контактної сили F між ВПД та ППЕ головного вагона від переміщень центра мас перешкоди u_b при зіткненні (система “ППЕ 1 – ППЕ ВР – ВПД”)

Таким чином, побудовано скінченно-елементні моделі, за якими визначено силову характеристику взаємодії елементів пасивного захисту головного вагона верхнього (ППЕ ВР) та нижнього (ППЕ 1) рівнів з великогабаритним транспортним засобом масою 15 т при зіткненні поїзда з ним зі швидкістю 110 км/год на залізничному переїзді згідно з умовами сценарію 3.

Висновки. У відділі статистичної динаміки і динаміки багатовимірних механічних систем ІТМ НАНУ і ДКАУ розроблено концепцію пасивного захисту вітчизняних швидкісних пасажирських поїздів при аварійних зіткненнях, що відповідають сценаріям стандарту ДСТУ EN 15227, пропозиції щодо пасивного захисту головного вагона моторвагонного поїзда, а також стільникові конструкції пристроїв поглинання енергії нижнього (ППЕ 1) і верхнього (ППЕ ВР) рівнів, призначених для розташування у лобовій частині головного вагона. В статті розглянуто сценарій 3 ДСТУ EN 15227: зіткнення еталонного моторвагонного поїзда зі швидкістю 110 км/год на залізничному переїзді з великим транспортним засобом масою 15 т, який моделюється великогабаритною перешкодою, що може деформуватися (ВПД). Розв’язано задачу щодо визначення силових характеристик взаємодії пристроїв ППЕ 1 та ППЕ ВР

з перешкодою при зіткненні з метою подальшої оцінки відповідності запропонованого пасивного захисту нормативним вимогам. Побудовано скінченно-елементні моделі для аналізу пластичного деформування елементів систем “ТПЕ 1 – ВПД”, “ТПЕ ВР – ВПД” та “ТПЕ 1 – ТПЕ ВР – ВПД” при зіткненні з урахуванням геометричної та фізичної нелінійностей, динамічного зміцнення сталі в залежності від швидкості удару, змінної контактної взаємодії елементів розглянутої системи. В результаті виконаних досліджень визначено силові характеристики взаємодії пристроїв поглинання енергії з перешкодою, а також сумарну характеристику залежності контактного зусилля між двома пристроями нижнього та двома пристроями верхнього рівня від переміщення центра мас перешкоди при зіткненні.

Запропоновані математичні моделі, отримані силові характеристики можуть бути використані при дослідженні динаміки зіткнення еталонного моторвагонного поїзда з великим транспортним засобом з метою оцінки відповідності пасивного захисту вітчизняного головного вагона, що проєктується, вимогам ДСТУ EN 15227.

1. Постанова Кабінету Міністрів України від 03 березня 2021 р. № 179 Про затвердження Національної економічної стратегії на період до 2030 року. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-natsionalnoyi-eko-a179> (дата звернення: 07.06.2021).
2. ДСТУ EN 12663-1:2018 (EN 12663-1:2010 + A1:2014, IDT). Залізничний транспорт. Структурні вимоги органів залізничного транспорту. Частина 1. Локомотиви та пасажирський рухомий склад (і альтернативний метод для вантажних вагонів). 2018. 18 с.
3. ДСТУ EN 15227:2015 (EN 15227:2008+A1:2010, IDT). Залізничний транспорт. Вимоги до ударостійкості рейкових транспортних засобів. 2016. 37 с.
4. Wingler F. Crash-energy management, Part II. URL: <http://www.drwingler.com/wp-content/uploads/2016/08/Crash-Energy-Management.pdf> (дата звернення: 16.09.2021).
5. Шаад Ф. Электропоезд серии ЭПМ. URL: <http://history.rw.by/lokomotivy/epm/> (дата звернення: 16.09.2021).
6. Электропоезд TRAVERSO для Швейцарии представлен на выставке InnoTrans 2018. Железные дороги мира. 2018. № 12. С. 23–32.
7. Alstom Coradia Regional Trains. URL: <https://www.railway-technology.com/projects/alstom-coradia-regional-trains/> (дата звернення: 16.09.2021).
8. Новый электропоезд для железных дорог Германии. Железные дороги мира. 2008. № 9. С. 48–55.
9. Roberts J., Fraikin B., Leveque D. Development and validation of a regional train platform to the requirements of EN 15227. Passive Safety of Rail Vehicles. Innovation in passive safety and interior design: the 7th International Symposium Passive Safety in Berlin on 20 – 21.11.2008: symposium proceedings. Berlin: IFV Bahntechnik e.V., 2008. Vol. 17. P. 237–248.
10. Banko F. P., Xue J. H. Pioneering the Application of High Speed Rail Express Trainsets in the United States. New York: Parsons Brinckerhoff Group Inc. One Penn Plaza, 2012. 328 p.
11. Соболевская М. Б., Сирота С. А. Основные положения концепции пассивной защиты скоростного пассажирского поезда при аварийных столкновениях. Техническая механика. 2015. № 1. С. 84–96.
12. Маркова О. М., Соболевська М. Б., Мокрій Т. Ф., Ковтун О. М., Горобець Д. В. Розробка рекомендацій щодо підвищення рівня безпеки залізничних пасажирських та вантажних перевезень. Технічна механіка. 2021. № 2. С. 78–90. <https://doi.org/10.15407/itm2021.02.078>
13. Соболевська М. Б., Науменко Н. Ю., Горобець Д. В. Математичне моделювання динамічної навантаженості головного вагона з системою пасивної безпеки при зіткненні ідентичних моторвагонних поїздів. Технічна механіка. 2020. № 2. С. 66–79. <https://doi.org/10.15407/itm2020.02.066>
14. Соболевська М. Б., Науменко Н. Ю., Горобець Д. В. Аналіз динамічної навантаженості екіпажів моторвагонного швидкісного поїзда з системою пасивної безпеки при його зіткненні з вантажним вагоном. Технічна механіка. 2020. № 3. С. 79–90. <https://doi.org/10.15407/itm2020.03.079>
15. Соболевская М. Б., Горобець Д. В., Сирота С. А. Определение характеристик препятствий для нормативных сценариев столкновений пассажирских поездов. Технічна механіка. 2018. № 2. С. 90–103. <https://doi.org/10.15407/itm2018.02.090>
16. Соболевська М. Б., Горобець Д. В. Аналіз взаємодії пасажирського поїзда із системою пасивної безпеки й великого дорожнього транспортного засобу при зіткненні. Технічна механіка. 2019. № 1. С. 90–106. <https://doi.org/10.15407/itm2019.01.094>
17. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.

Отримано 22.09.2021,
в остаточному варіанті 18.11.2021