УДК 629.4:62-788.2 https://doi.org/10.15407/itm2021.02.078

О. М. МАРКОВА, М. Б. СОБОЛЕВСЬКА, Т. Ф. МОКРІЙ, Д. В. ГОРОБЕЦЬ

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ БЕЗПЕКИ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ТА ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: sobmb@i.ua

Урядом України в 2020 р. було здійснено аудит економіки держави за майже 30 років її незалежності та визначено вектори вітчизняного економічного розвитку у напрямку на європейську та євроатлантичну інтеграцію. Аудит у галузі залізничного транспорту показав, що більшість активів залізниці є критично зношеними. Аудит та вектори стали відправною точкою для розробки Національної економічної стратегії України на період до 2030 року, затвердженої 03.03.2021 р. Одним з пріоритетів цієї стратегії є розвиток транспортної галузі в результаті виконання ряду послідовних кроків, зокрема оновлення залізничної колії та рухомого складу, впровадження високошвидкісного пасажирського залізничного транспорту, підвищення рівня безпеки залізничних перевезень та екологічної безпеки на залізничному транспорті. Метою роботи є розробка рекомендацій щодо підвищення рівня безпеки вітчизняних залізничних пасажирських та вантажних перевезень. В статті узагальнено накопичений за роки незалежності України досвід фундаментальних та прикладних наукових досліджень за транспортною тематикою, що виконувались у відділі статистичної динаміки і динаміки багатовимірних механічних систем Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України. Цей досвід може бути корисним для здійснення вищевказаних кроків на шляху до сталого розвитку вітчизняного залізничного транспорту. Особливу увагу в статті приділено новим дослідженням з пасивного захисту моторвагонного рухомого складу при аварійних зіткненнях, сценарії яких визначено діючим в Україні стандартом ДСТУ EN 15227. На основі математичної моделі зіткнення ідентичних моторвагонних поїздів розроблено математичну модель зіткнення моторвагонного поїзда з великим транспортним засобом на переїзді з урахуванням визначеної силової характеристики взаємодії головного вагона, обладнаного системою пасивної безпеки, і перешкоди, що може деформуватися. За допомогою розробленої математичної моделі проведено аналіз динамічної навантаженості екіпажів моторвагонного поїзда з системою пасивної безпеки при його зіткненні зі швидкістю 110 км/год з великим транспортним засобом масою 15 т на залізничному переїзді. З урахуванням результатів попередніх досліджень динаміки аварійних зіткнень моторвагонного поїзда з ідентичним поїздом та вантажним вагоном розроблено рекомендації щодо пасивного захисту вітчизняного головного вагона згідно з вимогами нормативних документів. Запропоновані математичні моделі, результати виконаних досліджень, розроблені конструкції пристроїв поглинання енергії та практичні рекомендації можуть бути використані при проєктуванні нового моторвагонного рухомого складу для вітчизняних залізниць з урахуванням вимог ДСТУ EN 15227 щодо пасивного захисту при аварійних зіткненнях.

Ключові слова: *залізничний транспорт, вантажні та пасажирські перевезення, моторвагонний поїзд, безпека руху, аварійне зіткнення, система пасивної безпеки, пристрої поглинання енергії.*

In 2020, the Ukrainian Government conducted an audit of the Ukrainian economy for nearly 30 years of independence and decided on the vectors of economic development aimed at European and Euro-Atlantic integration. The audit of the Ukrainian railways showed that most of the railway assets are critically worn. The audit and the vectors became a starting point for the development of the National Economic Strategy of Ukraine up to 2030, which was approved on March 3, 2021. One of the priorities of this strategy is the development of the transport sector by a succession of steps, including railway track and vehicle renewal, the introduction of high-speed passenger transport, and increasing railway traffic safety and environment safety on the Urrainian railways. The aim of this paper is to work out recommendations on increasing the safety of passenger and freight traffic in Ukraine. The paper generalizes the experience gained over the years of Ukrainian independence in the fundamental and applied transport-oriented reseach conducted at the Department of Sttistical Dynamics and Multidimensional Mechanical Systems, Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine. This experience may be useful in the implementation of the above steps on the way to the sustainable development of the Ukrainian railway transport. In the paper, the emphasis is on new investigations into the passive propection of the cars of a motor car train in emergency collisions whose scenarios are specified by Ukrainian State Standard DSTU EN 15227. Based on a mathematical model of a collision of identical motor car trains, a mathematical model was developed to simulate a collision of a motor car train with a large vehicle at a crossing with account for a specified force characteristic of interaction of the leading car equipped with a passive safety system with a deformable obstacle. The model developed was used in analyzing dynamic loads on the cars of a motor car train with a passive safety system in its collision at 110 km/h with a 15 t large vehicle at a railway crossing. With consideration for the results of previous investigations into the dynamics of emergency collisions of a motor car train with an identical train and a fright car, recommendations were worked out on the passive protection of a home-made leading car in accordance with the requirements of normative documents. The proposed mathematical models and designs of energy-absorbing devices, the research results, and the practical recommendations worked out may be used in designing new motor car train vehicles for the Ukrainian railways in accordance with the DSTU EN 15227 requirements for passive protection in emergency collisions.

Keywords: *railway transport, freight and passenger traffic, motor car train, traffic safety, emergency collision, passive safety system, energy-absorbing devices.*

Вступ. Урядом України в 2020 році було здійснено аудит економіки держави за майже 30 років її незалежності та визначено вектори її економічного розвитку у напрямку на європейську та євроатлантичну інтеграцію. Результати цього дослідження представлено прем'єр-міністром України 6 листопада 2020 року [1]. Аудит у галузі залізничного транспорту показав, що більшість активів залізниці є критично зношеними. Станом на кінець першого півріччя 2020 року із 26,7 тис. км колії 6,4 тис. км вимагають капітального ремонту, ще 2,7 тис. км – реконструкції. Ступінь зносу рухомого складу – понад 90 % (ступінь зносу тепловозів – 98 %, електровозів – 94 %, пасажирських вагонів – 93 %, вантажних вагонів АТ "Українська залізниця" – 90 %). Аудит та визначені вектори економічного розвитку держави стали відправною точкою для розробки Національної економічної стратегії України на період до 2030 року, затвердженої 03.03.2021 р. [2]. Розвиток транспортної галузі України є пріоритетом Національної економічної стратегії 2030. Стратегічною метою подальшого розвитку держави є забезпечення потреб української економіки за рахунок розвиненого та модернізованого транспорту та інфраструктури. Пріоритетними кроками для досягнення цієї мети є капітальний ремонт залізничної колії та інших елементів залізничної інфраструктури, оновлення та модернізація рухомого складу, зокрема тягового рухомого складу, впровадження високошвидкісного пасажирського залізничного транспорту, підвищення рівня безпеки залізничних перевезень та екологічної безпеки на залізничному транспорті [1, 2].

Відділ статистичної динаміки і динаміки багатовимірних механічних систем Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і ДКАУ) має багаторічний досвід у розробці науково обґрунтованих рішень, пов'язаних з вищевказаними пріоритетними кроками, а саме:

– створено математичні моделі та відповідне програмне забезпечення для дослідження просторових коливань залізничних екіпажів та поїздів із урахуванням їх конструктивних особливостей, фізичних та геометричних нелінійностей системи, роботи автозчепних пристроїв, технічного стану рейкової колії, специфіки вантажу, що транспортується [3 – 5];

– розроблено методики, які дозволяють за допомогою комп'ютерного моделювання дослідити динамічні процеси, що відбуваються при русі окремих локомотивів, вагонів та поїздів на ділянках колії довільного обрису як при експлуатаційних режимах, так і в аварійних ситуаціях, пов'язаних із можливістю сходу окремих вагонів з рейок, зіткненням поїздів і наїздом поїзда на перешкоду [6 – 7];

– виконано цикл теоретичних і експериментальних досліджень, пов'язаних з вирішенням проблеми оновлення вантажного парку залізниць України, з метою підвищення динамічних якостей екіпажів, збільшення ресурсу ходових частин, зниження зносу елементів рухомого складу і колії. На основі результатів цих досліджень запропоновано для залізниць з шириною колії 1520 мм комплексну модернізацію візків вантажних вагонів. У візках замінено погано працюючі стандартні ковзуни ковзунами постійного контакту; замість сталевих клинів встановлено клини з високоміцного чавуну; фрикційні планки замінено сталевими зносостійкими; в підп'ятники укладено полімерні прокладки, змінено також стандартний профіль обода коліс розробленим в ІТМ НАНУ і ДКАУ зносостійким профілем ІТМ-73. За допомогою

зазначеної модернізації вдалося досягти більш ніж дворазового збільшення ресурсу колеса за зносом гребеня, більш ніж десятикратного зменшення зносу в клиновій системі гасіння коливань, зниження в 4 – 5 разів зносу п’ятникового вузла. В продовження робіт щодо вдосконалення комплексної модернізації візків вантажних вагонів створено нові зносостійкі профілі ободів коліс ІТМ-73-01, ІТМ-73-02 та ІТМ-73-03. Як показали експлуатаційні випробування вантажних вагонів з комплексно модернізованими візками, застосування спочатку для незношених коліс профілю ІТМ-73, а потім, при обточках, профілю ІТМ-73-01 дозволяє збільшити ресурс коліс (у порівнянні зі стандартними колесами) більш ніж у чотири рази. Використання профілів обода коліс ІТМ-73-02 та ІТМ-73-03 для перспективних одиниць вантажного рухомого складу (з візками моделі 18-7020 і 18-9817) за прогнозними даними дозволить забезпечити підвищені вимоги до вагонів нового покоління щодо їх пробігу до першого деповського ремонту без обточування колісних пар за зносом гребенів коліс [8 – 10];

– розроблено методичне забезпечення та математичні моделі для дослідження в рамках дискретно-масових і скінченно-елементних схем динаміки, навантаженості та напружено-деформованого стану елементів конструкцій вагонів-цистерн при характерних для експлуатації нормативних впливах та наднормативних ударах автозчепом сусіднього вагона в аварійних ситуаціях [11 – 13];

– розроблено технічні пропозиції та практичні рекомендації щодо створення ефективних засобів захисту днищ котлів вагонів-цистерн від пробивання, запропоновано конструкцію закріпленого на рамі вагона-цистерни запобіжного торцевого щита зі стільниковими енергопоглинаючими елементами та розроблено методику визначення раціональних параметрів цієї захисної конструкції. Результати досліджень використано при створенні спільно з ВАТ “Маріупольський завод важкого машинобудування” безрамної конструкції чотиривісного вагона-цистерни для залізниць Індії і вагона-цистерни для перевезення скрапленого газу, днища котла якого обладнані торцевими запобіжними щитами запропонованої конструкції (рис. 1) [14].

Рис. 1 – Вагон-цистерна з захисним щитом

Особливе місце в роботі відділу займає вирішення проблеми створення в Україні високошвидкісного залізничного пасажирського рухомого складу, обладнаного засобами пасивного захисту. Актуальною проблемою в Україні є кардинальне оновлення залізничної галузі, підвищення безпеки пасажирських перевезень, організація власного виробництва екіпажів швидкісних поїздів локомотивної тяги та моторвагонного рухомого складу з системою пасивної безпеки (СПБ) згідно з вимогами діючих стандартів ДСТУ EN 12663 [15] та ДСТУ EN 15227 [16]. Розробка нового покоління пасажирських залізничних екіпажів повинна базуватися на результатах математичного моделювання їх навантаженості в експлуатації та при аварійних зіткненнях, а також на результатах відповідних експериментальних випробувань.

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 [17].

Для визначення силової характеристики взаємодії локомотива або головного вагона з системою пасивної безпеки та великого транспортного засобу при зіткненні на переїзді згідно з вимогами ДСТУ EN 15227 розроблено модель перешкоди, що може деформуватися [18].

Розроблено алгоритм для визначення параметрів пристроїв поглинання енергії відповідно до запропонованої концепції пасивного захисту пасажирського поїзда. Алгоритм включає визначення енергоємності пристроїв поглинання енергії для забезпечення виконання нормативних сценаріїв зіткнень та вибір параметрів захисних конструкції з необхідною енергоємністю [19].

Розроблено математичні моделі та програмне забезпечення для дослідження динаміки пасажирських поїздів локомотивної тяги та моторвагонного рухомого складу, обладнаних системою пасивної безпеки, при аварійних зіткненнях з урахуванням особливостей спільної роботи зсувних об’єднаних ударно-тягових приладів, протипідйомних пристроїв, пристроїв поглинання енергії (ППЕ) і конструкцій екіпажів, а також можливості виникнення пластичних деформацій в елементах конструкцій залізничних екіпажів [20 – 21].

Розроблено науково-методичне забезпечення і скінченно-елементні моделі для дослідження пластичного деформування стільникових конструкцій пристроїв поглинання енергії при ударах [19].

Розроблено засновану на синтезі автоматизованого геометричного конструювання та скінченно-елементного моделювання методику для дослідження напружено-деформованого стану елементів конструкцій локомотивів і пасажирських вагонів, обладнаних засобами пасивного захисту, при ударних навантаженнях, характерних для експлуатації та аварійних зіткнень [22 – 23].

Розроблено математичні моделі для аналізу пружно-пластичного деформування елементів каркаса кабіни швидкісного пасажирського локомотива з системою пасивної безпеки при ударних навантаженнях, що виникають в аварійних ситуаціях, з урахуванням геометричної та фізичної нелінійностей, динамічного зміцнення сталі в залежності від швидкості удару; змінної контактної взаємодії елементів конструкцій з перешкодою і між собою [24].

Розроблено конструкцію пристрою поглинання енергії для системи пасивної безпеки пасажирського локомотива при аварійних зіткненнях [25].

Виконано натурний креш-тест розробленого пристрою поглинання енергії на випробувальному полігоні в м. Герліц (Німеччина) (рис. 2) [26].

На основі результатів виконаних досліджень розроблено, виготовлено та впроваджено у виробництво модульну кабіну машиніста швидкісного пасажирського електровоза нового покоління з елементами системи пасивної безпеки. Електровоз з розробленою кабіною і пристроями поглинання енергії введено в експлуатацію (рис. 3) [24 – 25].

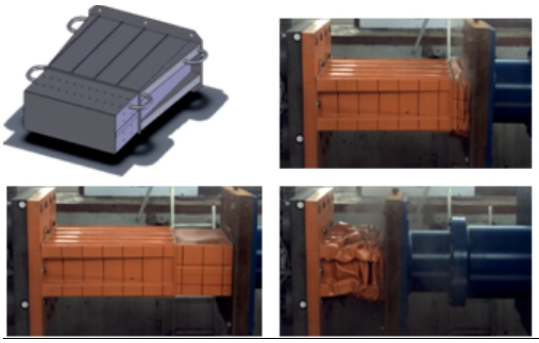


Рис. 2 – Креш-тест ППЕ для локомотиву

Рис. 3 – Електровоз з СПБ

В результаті комплексу досліджень на основі математичного моделювання динаміки еталонних пасажирських поїздів локомотивної тяги при аварійних зіткненнях розроблено рекомендації з пасивного захисту локомотивів і вагонів, призначених для експлуатації на вітчизняних залізницях. Розроблено конструкції пристроїв поглинання енергії, призначені для установки в кінцевих частинах пасажирських локомотивів і проміжних вагонів на рівні автозчепу. Запропоновані пристрої дозволяють забезпечити захист пасажирів та обслуговуючого персоналу при зіткненнях поїздів локомотивної тяги з перешкодами згідно з вимогами ДСТУ EN 15227 [24 – 25].

Пасивний захист моторвагонного рухомого складу. Оновлення вітчизняного пасажирського моторвагонного рухомого складу передбачає створення нових конструкцій залізничних екіпажів, обладнаних, крім ефективних засобів активної безпеки для попередження аварійних зіткнень, системою пасивної безпеки, основним завданням якої є створення умов для збереження життя і здоров’я пасажирів та персоналу поїзда, зменшення пошкоджень рухомого складу та мінімізація важких наслідків аварійних зіткнень, а також зниження ризику наповзання екіпажів одного на другий та сходу рухомого складу з рейок. До складу СПБ входять зсувні автозчепні пристрої, протипідйомні пристрої, пристрої поглинання енергії. Призначенням ППЕ є зниження до допустимого рівня поздовжніх зусиль та прискорень, що виникають при аварійних зіткненнях. СПБ повинна забезпечити захист головного вагона при визначених стандартом ДСТУ EN 15227 сценаріях зіткнення. Оскільки при аварійному зіткненні поїзда з перешкодою на залізничній колії основний удар отримує головний вагон, особливу увагу приділено розробці інтегрованих в його конструкцію пристроїв поглинання енергії.

Стандартом ДСТУ EN 15227 визначено наступні сценарії зіткнень (рис. 4):

– сценарій 1 – лобове зіткнення двох ідентичних поїзних складів зі швидкістю 36 км/год;

– сценарій 2 – лобове зіткнення зі швидкістю 36 км/год поїзного складу з вантажним вагоном масою 80 т;

– сценарій 3 – лобове зіткнення зі швидкістю 110 км/год поїзного складу з великим дорожнім транспортним засобом масою 15 т на переїзді.

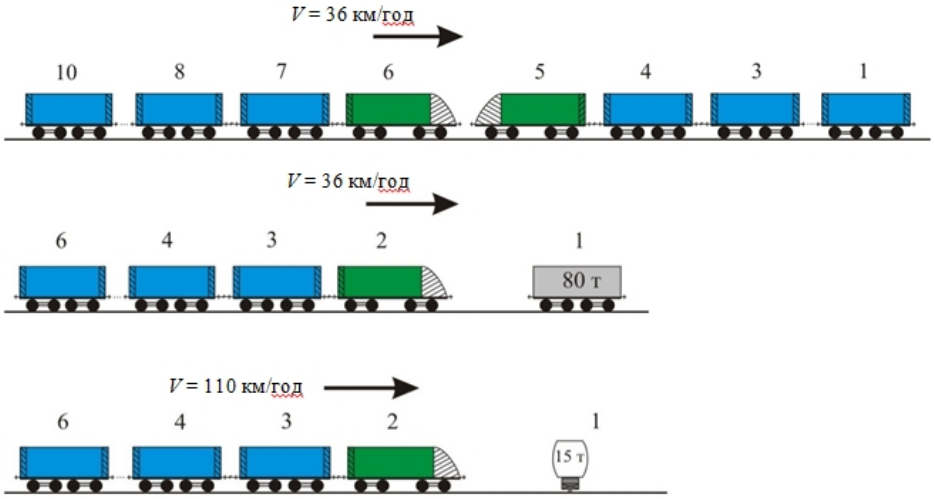


Рис. 4 – Сценарії зіткнень моторвагонного поїзда, визначені ДСТУ EN 15227

При розробці конструкції головного вагона розглядається еталонний поїзд, що складається з головного вагона і чотирьох причіпних вагонів.

Критерії для оцінки відповідності розроблених конструкцій рухомого складу з СПБ вимогам стандарту EN 15227:

– збереження неушкодженим простору для виживання пасажирів і поїзної бригади протягом усього часу деформування пристроїв поглинання енергії. В кабіні управління довжина такого простору повинна складати не менше 0,75 м;

– допускаються пластичні деформації окремих елементів несучої конструкції кузова одиниці рухомого складу, що не приводять до втрати кузовом загальної несучої здатності;

– середнє значення поздовжнього прискорення в зонах безпеки не повинно перевищувати 5 g для сценаріїв 1 і 2 та 7,5 g для сценарію 3. (Середнє значення прискорення для кожної одиниці поїзного складу визначається, починаючи з моменту часу, коли результуюча контактна сила перевищить нульове значення, і до моменту часу, коли це значення знову впаде до нуля).

Проведені патентно-бібліографічні дослідження існуючих засобів пасивного захисту головних вагонів при аварійних зіткненнях згідно з вимогами ДСТУ EN 15227 дозволили встановити, що лідируючі позиції в цьому питанні займають Німеччина. Франція, Швейцарія, Австрія, Японія, Південна Корея. На теперішній час посилюється активність патентування технічних рішень з пасивного захисту в Китаї. Головний вагон з СПБ, як правило, обладнується дворівневою системою ППЕ, розташованих на рівні зчіпного пристрою (ППЕ нижнього рівня) та в лобовій підвіконній частині вище рівня зчіпного пристрою (ППЕ верхнього рівня) [27].

Розроблено пропозиції для пасивного захисту вітчизняного головного вагона:

– обладнати головний вагон (та проміжні вагони) зсувними автозчепами, які при зіткненні зсуваються у запланований при проєктуванні підвагонний простір. Зсувні зчіпні пристрої при аварійному зіткненні повинні забез-

печити контакт і роботу протипідйомних пристроїв і ППЕ, інтегрованих в кінцеві частини головного вагона. Зсувні зчіпні пристрої доцільно розробляти на основі автозчепів СА-3 і беззазорних зчіпних пристроїв (БЗП) з використанням американського досвіду створення зсувних автозчепів або автозчепів типу Scharfenberg. У міжвагонних з'єднаннях доцільно використовувати зсувні БЗП;

– передбачити наявність протипідйомних пристроїв, які можуть бути суміщені з ППЕ або самостійними конструкціями, що встановлюються в кінцевих частинах вагона для запобігання наповзання вагона на вагон при аварійних зіткненнях;

– ввести в конструкції кузова та рами вагона посилені елементи для організації зони безпеки для виживання та евакуації пасажирів та машиніста;

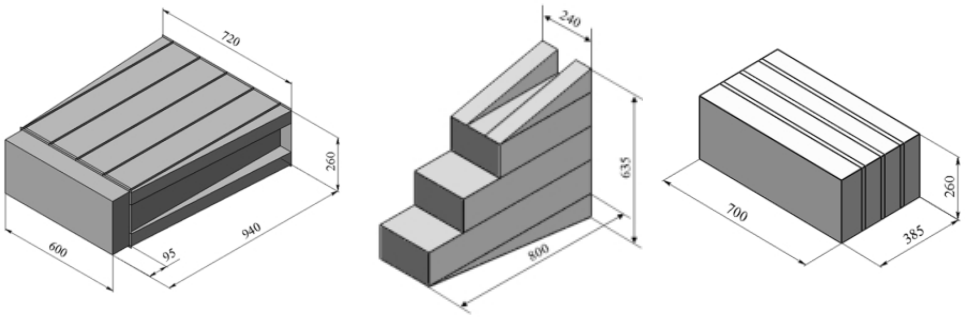
– прийняти такі допустимі значення динамічних навантажень (при яких появляються пластичні деформації в елементах конструкцій) при зіткненнях згідно зі сценаріями ДСТУ 15227: 4,2 МН для рами головного вагона, 3,0 МН для рами вагона та 0,7 МН для лобової стінки кабіни машиніста;

– розмістити два ППЕ нижнього рівня (на рівні автозчепу) з загальною енергоємністю порядку 2 МДж в лобовій частині головного вагона, два ППЕ верхнього рівня (у підвіконній частині кабіни машиніста) з загальною енергоємністю порядку 0,25 МДж та два ППЕ нижнього рівня з загальною енергоємністю порядку 0,6 МДж у хвостовій частині головного вагона;

– використати в конструкціях ППЕ нижнього та верхнього рівнів коробчасті конструкції в формі усіченої піраміди зі стільниковими пакетами всередині;

– при розробці конструкцій ППЕ для головного вагона використати досвід успішної розробки ППЕ для локомотива та результати креш-тесту прототипу цього ППЕ.

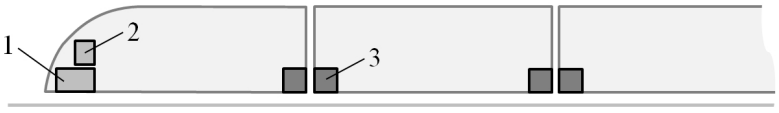
Для пасивного захисту моторвагонного поїзда запропоновано використовувати стільникові конструкції пристроїв поглинання енергії нижнього (ППЕ 1) і верхнього (ППЕ ВР) рівнів (рис. 5). Пристрої ППЕ 1 та ППЕ ВР призначено для установки в лобовій частині головного вагона, а пристрої ППЕ 2 – для установки в його хвостовій частині та замість буферів у міжвагонних з'єднаннях [21].



ППЕ 1 ППЕ ВР ППЕ 2

Рис. 5 – Пристрої поглинання енергії для головного та проміжних вагонів

Схему розміщення ППЕ у вагонах поїзда показано на рис. 6.



1 – ППЕ 1; 2 – ППЕ ВР; 3 – ППЕ 2

Рис. 6 – Схема розміщення ППЕ в вагонах поїзда

На основі аналізу європейського досвіду з пасивного захисту головного вагона побудовано тривимірну геометричну модель лобової частини головного вагона для вітчизняних залізниць і розглянуто можливі варіанти розміщення в ній ППЕ нижнього та верхнього рівнів (рис. 7).

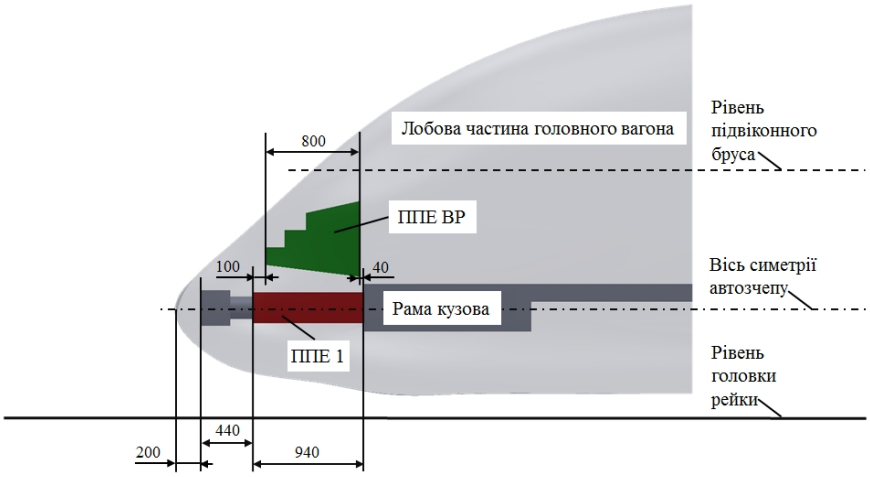


Рис. 7 – Схема розміщення ППЕ в лобовій частині головного вагона

Математичні моделі динаміки зіткнень. Розроблено математичну модель та програмні модулі для дослідження динаміки зіткнень ідентичних еталонних моторвагонних поїздів, які розглядаються як ланцюжки твердих тіл, з'єднаних між собою істотно нелінійними елементами [21]. Процес лобового зіткнення поїздів (сценарій 1) на прямолінійній ділянці колії описано системою диференціальних рівнянь

$$\dot{v}_i = m_i^{-1}\left[S_i - S_{i+1} + F_i\right] \ (i = 1,\ 2, \cdots, 2N);$$
$$\dot{q}_i = v_{i-1} - v_i \quad (i = 2,\ 3, \cdots, 2N); \quad q_i = x_{i-1} - x_i \ \ (i = 2,\ 3, \cdots, 2N);$$
$$S_i = S_i(q_i, \dot{q}_i) \quad (i = 2,\ 3, \cdots, 2N); \quad S_1 = S_{2N+1} = 0;$$
$$v_i = v_{i0}\,(i = 1, \cdots, N); \qquad v_i = 0 \quad (i = N+1, \cdots, 2N),$$

де m_i – маса i-го екіпажа; x_i, v_i, $\dot{v}_i$ – переміщення, швидкість та прискорення i-го екіпажа; S_i – поздовжнє зусилля в з'єднанні між i-м та $(i-1)$-м екіпажами; q_i, $\dot{q}_i$ – відносні переміщення та швидкість i-го екіпажа; F_i – зовнішня сила, що діє на i-й екіпаж; N – число екіпажів у кожному поїзді.

Силова характеристика міжвагонного з'єднання враховує роботу поглинальних апаратів зчіпних пристроїв, можливість зсуву об'єднаних ударно-тягових пристроїв у підвагонний простір, пластичне деформування пристроїв поглинання енергії нижнього та верхнього рівнів, можливість виникнення пластичних деформацій в конструкціях вагонів. Запропонована математична модель дозволяє отримати середні значення прискорень екіпажів і пластич-

них деформацій їх конструкцій для порівняння з допустимими значеннями згідно з критеріями ДСТУ EN 15227.

На основі математичної моделі зіткнення ідентичних моторвагонних поїздів розроблено математичну модель для дослідження зіткнень еталонного поїзда з вантажним вагоном (сценарій 2) з урахуванням силової характеристики взаємодії головного вагона та перешкоди [28].

Розроблено скінченно-елементні моделі для визначення силової характеристики взаємодії елементів пасивного захисту (верхнього та нижнього рівнів) головного вагона з великим транспортним засобом (сценарій 3), який є великогабаритною перешкодою, що може деформуватися (ВПД) при зіткненні. Скінченно-елементну схему взаємодії елементів пасивного захисту з ВПД (розглянуто половину конструкції ВПД, відсічену центральною поперечно-вертикальною площиною симетрії та відповідно один пристрій ППЕ 1 та один пристрій ППЕ ВР) показано на рис. 8.

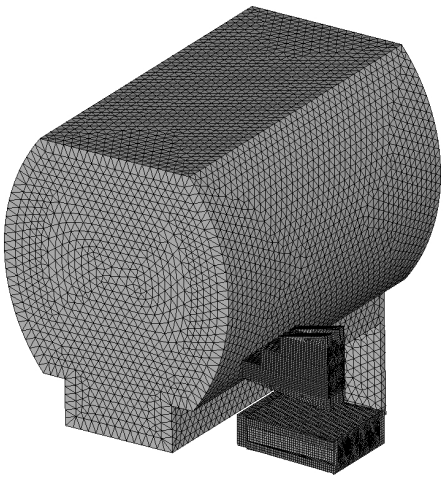


Рис. 8 – Скінченно-елементна схема взаємодії ППЕ з ВПД (сценарій 3)

На основі математичної моделі зіткнення ідентичних моторвагонних поїздів розроблено математичну модель зіткнення еталонного поїзда з великогабаритним транспортним засобом на залізничному переїзді (сценарій 3) з урахуванням визначеної силової характеристики взаємодії ВПД з двома ППЕ 1 та двома ППЕ ВР та роботи конструкції головного вагона при зіткненні.

Результати досліджень. Розглядається еталонний моторвагонний поїзд, що складається з головного вагона масою 80 т і чотирьох проміжних вагонів масою 64 т, яка відповідає типовій масі проміжного вагона, що використовується на вітчизняних залізницях з шириною колії 1520 мм. Прийнято, що поздовжня сила, при якій виникають пластичні деформації в конструкціях екіпажів, для головних вагонів становить 4,2 МН, для проміжних – 3 МН [21]. Лобові частини кожного з головних вагонів обладнано двома ППЕ 1 та двома ППЕ ВР, хвостові частини – двома ППЕ 2, проміжні вагони обладнано спереду і ззаду двома ППЕ 2.

Виконано дослідження динамічної навантаженості головного вагона з елементами системи пасивної безпеки при зіткненні ідентичних еталонних мотор-

вагонних поїздів (сценарій 1). Встановлено, що запропонований пасивний захист відповідає критеріям стандарту ДСТУ EN 15227 для сценарію 1 [21].

Встановлено, що при зіткненні еталонного поїзда з вантажним вагоном (сценарій 2), пластичні деформації в елементах конструкцій екіпажів не виникають, середні абсолютні значення поздовжніх прискорень екіпажів не перевищують 5 g . Таким чином, розглянутий пасивний захист екіпажів моторвагонного поїзда відповідає критеріям ДСТУ EN 15227 для сценарію 2 [28].

Визначено залежність контактного зусилля від переміщення центра мас перешкоди (рис. 9) при зіткненні поїзда з великим транспортним засобом на переїзді (сценарій 3).

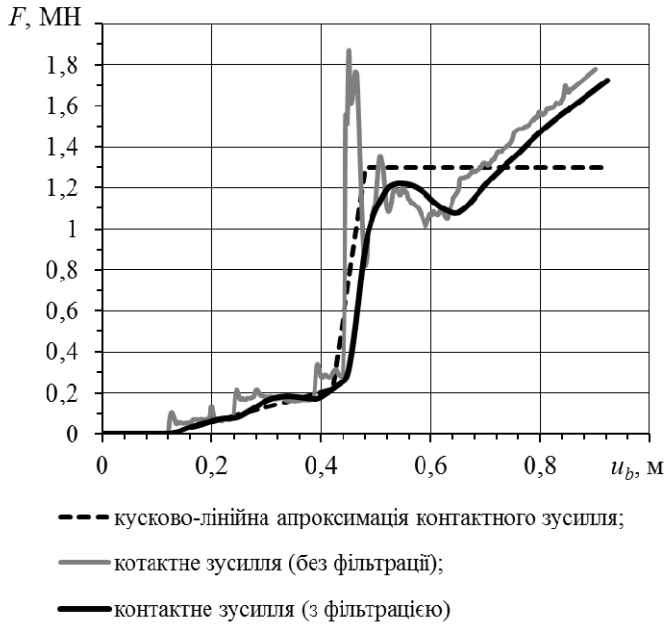


Рис. 9 – Залежність контактного зусилля F між ВПД та ППЕ головного вагона від переміщень центра мас перешкоди u_b при зіткненні (сценарій 3, система “ППЕ 1 – ППЕ ВР – ВПД”)

При побудові цієї діаграми застосовано фільтр нижніх частот з частотою зрізу 180 Гц відповідно до вимог ДСТУ EN 15227.

Проведено аналіз динамічної навантаженості екіпажів розглянутого еталонного поїзда при його зіткненні зі швидкістю 110 км/год з ВПД масою 15 т (сценарій 3). Отримані результати наведено в (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати досліджень (сценарій 3)

Номер екіпажа, i	Максимальні абсолютні значення зусиль та прискорень		Середні абсолютні значення зусиль та прискорень	
	S_i, МН	$\ddot{x}_i$, g	S_i, МН	$\ddot{x}_i$, g
2	11,23	13,37	6,13	7,29
3	2,00	3,12	1,75	1,74
4	2,00	2,80	1,04	0,29
5	2,00	2,50	1,25	0,84
6	0,93	1,45	0,30	0,47

Як свідчать наведені в табл. 1 результати, запропонований пасивний захист відповідає критеріям ДСТУ EN 15227 для сценарію 3.

Проведено аналіз впливу параметрів конструкцій ППЕ ВР на силові характеристики взаємодії головного вагона з перешкодами, визначеними ДСТУ EN 15227 та визначено раціональні параметри ППЕ ВР, виготовленого зі сталі марки 08Ю.

Встановлено можливість використання для виготовлення конструкцій ППЕ 1, ППЕ 2 та ППЕ ВР замість сталі марки 08Ю алюмінієвого сплаву АМг6. Визначено параметри конструкцій розглянутих ППЕ, виготовлених з цього алюмінієвого сплаву.

Розроблено наступні рекомендації щодо пасивного захисту вітчизняного головного вагона згідно з ДСТУ EN 15227.

1. Інтегрувати в конструкцію головного вагона систему пасивної безпеки, яка включає полегшені зсувні автозчепи (типу Scharfenberg), скидачку, ППЕ з протипідйомними пристроями у лобовій та хвостовій частинах вагона.
2. Розробити конструкції кузова та рами вагона, які дозволять без втрати їх несучої здатності забезпечити роботу СПБ при ударі.
3. Розмістити два ППЕ нижнього рівня в лобовій частині головного вагона, два ППЕ верхнього рівня (у підвіконній частині кабіни машиніста) та два ППЕ нижнього рівня у хвостовій частині головного вагона.
4. Використати в якості пристроїв поглинання енергії нижнього рівня для лобової частини головного вагона розроблені конструкції ППЕ 1, що мають енергоємність 0,95 МДж, робочий хід 0,7 м. Конструкція ППЕ 1 включає два послідовно розташованих елементи. Елемент 1 – короб з одношаровим пакетом шестигранних стільників всередині. Елемент 2 – це усічена піраміда, що складається із стільників з трикутними чарунками.
5. Використати в якості пристроїв поглинання енергії нижнього рівня для хвостової частини головного вагона розроблені на основі елемента 1 конструкції ППЕ 2, що мають енергоємність 0,3 МДж, робочий хід 0,3 м.
6. Використати в якості пристроїв поглинання енергії верхнього рівня для підвіконної частині кабіни машиніста розроблені на основі елемента 2 у вигляді трьох ступенів ППЕ ВР, що мають енергоємність 0,12 МДж, робочий хід 0,6 м.
7. Пристрої пасивного захисту ППЕ 1 та ППЕ ВР доцільно розміщувати в лобовій частині за запропонованою схемою (див. рис. 7), яка дозволить забезпечити виконання вимог стандарту ДСТУ EN 15227.
8. Для виготовлення конструкцій запропонованих пристроїв поглинання енергії доцільно використовувати сталі марки 08Ю або алюмінієвий сплав АМг6, який має високі пластичні властивості, низьку густину та високу інертність до агресивного зовнішнього середовища.
9. Рекомендовано при виготовленні запропонованих пристроїв поглинання енергії зі сталі марки 08Ю обирати наступні товщини пластин для елемента 1 ППЕ 1 – 0,6 мм, елемента 2 ППЕ 1 – 2,2 мм, для ППЕ 2 – 0,7 мм, для ППЕ ВР – 0,8 мм.
10. Рекомендовано при виготовленні запропонованих пристроїв поглинання енергії з алюмінієвого сплаву АМг6 обирати наступні параметри, зокрема товщини пластин для елемента 1 ППЕ 1 – 0,7 мм, елемента 2 ППЕ 1 – 3,0 мм, для ППЕ 2 – 0,8 мм, для ППЕ ВР – 1,2 мм.

Висновки. В статті узагальнено накопичений за роки незалежності України досвід відділу статистичної динаміки і динаміки багатовимірних механічних систем ІТМ НАНУ і ДКАУ у розробці науково обґрунтованих рішень, пов'язаних з вирішенням актуальних проблем вітчизняного залізничного транспорту. Цей досвід може бути використаний при капітальному ремонті залізничної колії, при оновленні та модернізації рухомого складу українських залізниць, для підвищення рівня безпеки вантажних і пасажирських перевезень та екологічної безпеки на залізничному транспорті.

Особливу увагу в статті приділено новим дослідженням з пасивного захисту моторвагонного рухомого складу. На основі математичної моделі зіткнення ідентичних моторвагонних поїздів розроблено математичну модель зіткнення моторвагонного поїзда з великим транспортним засобом на переїзді з урахуванням визначеної силової характеристики взаємодії головного вагона, обладнаного системою пасивної безпеки, і перешкоди, що може деформуватися. Запропонована математична модель дозволяє отримати середні значення прискорень екіпажів і пластичних деформацій їх конструкцій для порівняння з допустимими значеннями згідно критеріїв ДСТУ EN 15227.

За допомогою розробленої математичної моделі проведено аналіз динамічної навантаженості екіпажів моторвагонного поїзда з СПБ при зіткненні еталонного моторвагонного поїзда зі швидкістю 110 км/год з великим транспортним засобом масою 15 т на переїзді.

З урахуванням результатів попередніх досліджень динаміки аварійних зіткнень моторвагонного поїзда з ідентичним поїздом та вантажним вагоном розроблено рекомендації щодо пасивного захисту вітчизняного головного вагона згідно з вимогами нормативних документів.

Запропоновані математичні моделі, результати виконаних досліджень, розроблені конструкції пристроїв поглинання енергії та рекомендації можуть бути використані при проєктуванні нових конструкцій моторвагонного рухомого складу для вітчизняних залізниць з урахуванням вимог ДСТУ EN 15227 щодо пасивного захисту при аварійних зіткненнях.

1. Національна економічна стратегія 2030. URL: https://nes2030.org.ua/#rec246067109 (Дата звернення: 07.06.2021).
2. 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-nacionalnoyi-eko-a179 (Дата звернення: 07.06.2021).
3. *Sladkowski A., Scheffel H., Kovtun H., Markova O., Kik W., Moelle D.* Rail vehicle dynamics and associated problems. Gliwice : Silesian University of Technology, 2005. 118 p.
4. *Markova O., Kovtun H., Maliy V.* Modeling train motion along arbitrary shaped track in transient regimes. Rail and Rapid Transit. 2015. Vol. 229(1). P. 97–105. https://doi.org/10.1177/0954409713501806
5. *Markova O., Kovtun H., Maliy V.* Six-Axle Locomotive Dynamics at Standard and Emergency Motion Conditions. Advances in Engineering Research. Edited by V. Petrova. Nova Science Publishers, Inc., New York, 2019, USA. C.121-168. 233c. ISBN: 978-1-53614-804-6, ISSN: 2163-3932.
6. *Markova O., Kovtun H., Maliy V.* 3D model to study transitional regimes of train motion. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 985. 012003. https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012003
7. *Демин Ю. В., Богомаз Г. И., Науменко Н. Е.* Динамика машиностроительных и транспортных конструкций при нестационарных воздействиях. К.: Наук. думка, 1995. 189 с.
8. *Ушкалов В. Ф., Лашко А. Д., Мокрий Т. Ф.* Модернизация тележек грузовых вагонов как ва-риант обновления ходовых частей грузового подвижного состава. Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 5. С. 8–15.
9. *Ушкалов В. Ф., Мокрий Т. Ф., Малышева И. Ю., Безрукавый Н. В.* Износостойкий профиль колеса для грузового вагона с повышенной осевой нагрузкой. Технічна механіка. 2018. № 1. С. 20–29. https://doi.org/10.15407/itm2018.01.020
10. *Ushkalov V., Mokriy T., Malysheva I., Lapina L., Pasichnik S. and Bezrukavyi N.* Reduction of freight car wheel wear of 1520 mm gauge railways// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 985. 012004. https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012004
11. *Богомаз Г. И.* Динамика железнодорожных вагонов-цистерн. К.: Наук. думка, 2004. 223 с.

12. *Богомаз Г. И., Бубнов В. М., Демин Ю. В., Кельрих М. Б., Соболевская М. Б.* Оценка нагруженности железнодорожных цистерн при нормативных и сверхнормативных ударных воздействиях. Техническая механика. Вып. 2. 1993. С. 104–110.
13. *Богомаз Г.И., Волков В.А., Соболевская М.Б.* Динамическая нагруженность элементов конструкций вагонов-цистерн при аварийных ударах в днище.Транспорт: Сборник научных работ. Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта. Вып. 6. 2000. С. 48–51.
14. *Богомаз Г. И., Бубнов В. М., Волков В. А., Соболевская М. Б., Хрущ И. К.* Оценка параметров средств защиты днищ котлов железнодорожных цистерн при аварийных воздействиях. Техническая механика. Вып. 1. 2000. С. 135–143.
15. 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.
16. ДСТУ EN 15227:2015 (EN 15227:2008+A1:2010, IDT). Залізничний транспорт. Вимоги до ударостійкості рейкових транспортних засобів. 2016. 37 с.
17. *Соболевская М. Б., Сирота С. А.* Основные положения концепции пассивной защиты скоростного пассажирского поезда при аварийных столкновениях. Техническая механика. 2015. № 1. С. 84–96.
18. *Соболевская М. Б., Горобец 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
19. *Науменко Н. Ю., Соболевська М. Б., Горобець Д. В., Маркова О. М., Ковтун О. М., Малий В. В., Хижа І. Ю.* Розробка рішень по забезпеченню безпеки залізничних перевезень і пасивному захисту пасажирського поїзда при його аварійних зіткненнях. Технічна механіка. 2018. № 3. С. 98–111. https://doi.org/10.15407/itm2018.03.098
20. *Науменко Н. Е., Соболевская М. Б., Хижа И. Ю.* Оценка динамической нагруженности эталонного поезда с системой пассивной безопасности при его столкновениях с идентичным составом и грузовым вагоном. Технічна механіка. 2017. № 3. С. 72–83. https://doi.org/10.15407/itm2017.03.072
21. *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
22. *Науменко Н. Ю., Соболевська М. Б., Сирота С. А.,* Горобець *Д. В.* Розробка елементів пасивного захисту швидкісних пасажирських локомотивів при аварійних зіткненнях на залізницях колії 1520 мм. Технічна механіка. 2017. № 1. С. 72–82. https://doi.org/10.15407/itm2017.01.072
23. *Науменко Н. Ю., Соболевська М. Б., Сирота С. А.,* Горобець *Д. В.* Розробка елементів пасивного захисту вагонів пасажирського поїзда нового покоління для залізниць колії 1520 мм. Технічна механіка. 2017. № 2. С. 73–83. https://doi.org/10.15407/itm2017.02.073
24. *Sobolevska M., Telychko I.* Passive safety system of an electric locomotive for high-speed opera-tion on the railways with 1520 mm gauge. Passive Safety of Rail Vehicles 2013 : Railway Research Network Proceedings of the 9th International Symposium "Passive Safety 2013 - Passive Safety of Rail Vehicles and Safe Interiors", Berlin, 21 - 22 February 2013. 43/2013. Berlin: IFV Bahntechnik e.V. 2013. P. 63–80.
25. *Sobolevska M., Telychko I.* Passive safety of high-speed passenger trains at accident collisions on 1520 mm gauge railways. Transport problems. 2017. V. 12, Issue 1. P 51–62. https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.1.5
26. *Соболевська М. Б., Сирота С. А., Горобець Д. В., Теличко І. Б.* Натурні ударні випробування дослідного зразка пристрою поглинання енергії, призначеного для пасивного захисту локомотива при зіткненнях. Технічна механіка. 2016. № 2. С. 91–105.
27. *Sobolevskaya M., Naumenko N. and Gorobets D.* Development of passive protection devices for a power head of a high-speed multiple unit train at its collisions according to DSTU EN 15227 // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 985. 012016. https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012016
28. *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

Отримано 04.06.2021,
в остаточному варіанті 08.06.2021