

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

**ТЕЛИЧКО ІГОР БОРИСОВИЧ**



УДК 625.28.282: 62-758.2

**УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КАБІНИ МАШИНІСТА  
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПАСИВНОЇ БЕЗПЕКИ ЛОКОМОТИВА  
ПРИ ЗІТКНЕННЯХ**

05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України, професор **УШКАЛОВ Віктор Федорович**, Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, завідувач відділу “Статистична динаміка механічних систем”.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **МАСЛІЄВ В’ячеслав Георгійович**, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, професор кафедри “Електричний транспорт і тепловозобудування”;

кандидат технічних наук, доцент **КОСТРИЦЯ Сергій Анатолійович** Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, завідувач кафедри “Будівельна механіка”.

Захист відбудеться “12” лютого 2015 року о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.02 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2.

Автореферат розісланий

“12” січня 2015 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
д.т.н., професор



**І. В. Жуковицький**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одним з головних напрямків розвитку залізничного транспорту в Україні є впровадження швидкісного пасажирського руху та забезпечення безпеки пасажирів і поїзної бригади при аварійному зіткненні поїзда з перешкодою. Для цього в Україні прийнято “Комплексну програму оновлення залізничного рухомого складу України на 2008 – 2020 роки”, згідно з якою повинен бути повністю замінений рухомий склад, зокрема існуючий парк локомотивів. Локомотив нового покоління повинен мати ефективні засоби активного захисту для запобігання аварійних зіткнень і систему пасивної безпеки (СПБ), яка дозволить зменшити тяжкість наслідків і зберегти життя пасажирів та персоналу поїзда, якщо зіткнення уникнути не вдалося. СПБ локомотива це сукупність технічних рішень в його конструкції та пристроїв поглинання енергії (ППЕ), призначених для зниження поздовжніх сил і прискорень в результаті контрольованого пластичного деформування та руйнування спеціальних жертвоних елементів та жертвоних зон в кінцевих частинах локомотива. Конструкція локомотива з СПБ повинна відповідати не тільки нормативним вимогам щодо її міцності при експлуатації, а й вимогам до пасивної безпеки, в яких визначаються тестові розрахункові сценарії зіткнень. У європейських пасажирських локомотивів обов’язкова наявність СПБ регламентується стандартом EN 15227. Аналогічний стандарт розробляється і для рухомого складу залізниць з шириною колії 1520 мм. Розробка кінцевих частин вітчизняного локомотива з СПБ, зокрема каркаса кабіни машиніста і ППЕ, повинна спиратися на технічні рішення, науково обґрунтовані дослідженнями напружено-деформованого стану (НДС) елементів конструкції локомотива при штатних навантаженнях та наднормативних ударах, що характеризують тестові сценарії аварійних зіткнень на залізницях колії 1520 мм. На теперішній час в країнах СНД відсутні методики, що дозволяють шляхом математичного моделювання оцінити НДС елементів конструкції локомотива з урахуванням специфіки пластичного деформування елементів СПБ при наднормативних динамічних навантаженнях. Тому актуальною проблемою є визначення основних вимог до пасивної безпеки локомотива при аварійних зіткненнях, розробка науково-методичного забезпечення і математичних моделей для аналізу деформування конструкції каркасу кабіни машиніста локомотива з СПБ при наднормативних ударах, проведення відповідних досліджень та створення на основі отриманих результатів принципово нової кабіни машиніста з жертвною зоною, зоною безпеки та ППЕ.

**Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Приведені в дисертації дослідження виконувалися у відповідності з планом науково-дослідної роботи Національної академії наук України на 2008 – 2012 рр. за темою № III-51-08 “Математичне моделювання та дослідження динаміки залізничних екіпажів з урахуванням особливостей роботи засобів їх захисту при ударних навантаженнях” (реєстраційний № 0100U001240).

**Мета і завдання досліджень.** Мета роботи – підвищення пасивної безпеки локомотива при аварійних зіткненнях шляхом створення кабіни машиніста з жертовною зоною, зоною безпеки і пристроями поглинання енергії.

Завдання дослідження:

- провести аналіз сучасних світових тенденцій та існуючих підходів до вирішення проблеми пасивного захисту локомотивів при аварійних зіткненнях;
- розробити основні вимоги до пасивної безпеки локомотива при тестових сценаріях аварійних зіткнень з перешкодою на колії 1520 мм;
- розробити конструктивно-компонувальну схему кабіни машиніста локомотива з інтегрованими елементами СПБ;
- розробити науково-методичне забезпечення та скінченно-елементні моделі для дослідження напружено-деформованого стану (НДС) елементів конструкції каркаса кабіни при наднормативних ударах;
- розробити скінченно-елементні моделі для дослідження НДС елементів конструкцій каркаса кабіни при статичних поздовжніх навантаженнях на лобову стінку;
- провести дослідження пластичного деформування елементів проектованої конструкції каркаса кабіни машиніста без урахування і з урахуванням ППЕ при наднормативних ударах за тестовими сценаріями зіткнень і визначити параметри базової конструкції каркаса;
- провести дослідження НДС елементів конструкції каркаса кабіни з жертовною зоною і зоною безпеки при статичному поздовжньому навантаженні на елементи лобової стінки і доопрацювати базову конструкцію каркаса відповідно до вимог нормативних документів щодо її міцності;
- виконати перевірку відповідності доопрацьованої конструкції каркаса кабіни з пультом управління і ППЕ прийнятим вимогам до пасивної безпеки локомотива;
- на основі результатів виконаних досліджень розробити модульну кабіну машиніста локомотива нового покоління з СПБ.

**Об'єкт досліджень** – поглинання енергії аварійного зіткнення локомотива з перешкодою в результаті пластичної деформації елементів жертовної зони каркаса кабіни машиніста і ППЕ.

**Предмет досліджень** – конструкція кабіни машиніста пасажирського локомотива нового покоління з елементами СПБ.

**Методи досліджень.** Для дослідження НДС елементів конструкції кабіни локомотива з СПБ використано методи скінченних елементів (МСЕ), лінійної алгебри і чисельного інтегрування. Для перевірки достовірності розробленого науково-методичного забезпечення та математичних моделей пластичного деформування конструкцій при стискаючих навантаженнях використано експериментальні методи.

**Достовірність та обґрунтованість результатів.** Адекватність розроблених скінченно-елементних моделей і достовірність одержаних результатів чисельного

моделювання підтверджуються: коректністю вибору розрахункових схем; достатнім ступенем деталізації геометричних моделей аналізованих конструкцій; тестуванням розроблених скінченно-елементних моделей; використанням для розв'язку нелінійних динамічних контактних задач спеціалізованого пакета програм, що має міжнародний сертифікат якості; хорошим узгодженням результатів теоретичних досліджень з даними випробувань і натурального креш тесту для ППЕ.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

– вперше розроблено нелінійні математичні моделі для аналізу НДС елементів конструкцій каркасу кабіни машиніста локомотива з СПБ, призначеного для експлуатації на залізницях з шириною колії 1520 мм, при наднормативних ударах з урахуванням змінної динамічної контактної взаємодії, пластичних деформацій, залежності фізико-механічних властивостей матеріалу від швидкості деформації;

– вперше отримано часові залежності контактної зусилля і енергії, що поглинається в процесі деформування елементів СПБ локомотива при ударах згідно тестових сценаріїв зіткнень на залізницях колії 1520 мм;

– вперше визначено параметри конструкції кабіни машиніста локомотива з елементами СПБ, які при тестових сценаріях зіткнень на колії 1520 мм забезпечують поглинання енергії 2 МДж без перевищення допустимого рівня поздовжнього прискорення в зоні безпеки та збереження простору не менше 750 мм для виживання та евакуації локомотивної бригади;

– отримало подальший розвиток науково-методичне забезпечення, засноване на синтезі автоматизованого геометричного конструювання та скінченно-елементного моделювання НДС елементів конструкції залізничного екіпажа при нормативних навантаженнях, в частині застосування для дослідження деформування елементів конструкцій каркаса кабіни машиніста локомотива з СПБ при статичних навантаженнях та при наднормативних ударах.

**Практична цінність дисертації полягає в розробці:**

– основних вимог до пасивної безпеки локомотива нового покоління при тестових сценаріях аварійних зіткнень на колії 1520 мм;

– методичного забезпечення для дослідження НДС елементів конструкцій каркасів кабін машиністів локомотивів з СПБ і без при наднормативних ударах;

– конструкції модульної кабіни машиніста швидкісного пасажирського локомотива з елементами СПБ.

В результаті виконаних досліджень розроблено, виготовлено і впроваджено у виробництво на ВАТ “Виробниче об’єднання Новочеркаський електровозобудівний завод” (ВАТ “ВО НЕВЗ”) конструкцію модульної кабіни машиніста електровоза ЕП20 з СПБ. Перший електровоз ЕП20 запущено в експлуатацію у 2012 р. На даний час в експлуатації перебувають 42 електровоза серії ЕП20 з СПБ.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. Особистий внесок здобувача полягає в плануванні та виконанні теоретичних досліджень, аналізі отриманих результатів,

розробці наукових положень і висновків. Дисертантом проведено аналіз нормативної бази, що регламентує пасивну безпеку локомотивів в країнах ЄС та СНД, аналіз існуючих варіантів СПБ локомотивів, розроблено основні вимоги до пасивної безпеки локомотива при аварійних зіткненнях на колії з шириною 1520 мм. За участю здобувача згідно визначених вимог розроблено конструктивно-компонувальну схему каркаса кабіни машиніста локомотива з СПБ; виконано математичне моделювання НДС елементів конструкції каркаса кабіни при статичних навантаженнях і динамічних впливах, що характеризують тестові сценарії зіткнення; виконано креш тест ППЕ. Під керівництвом дисертанта на основі аналізу отриманих результатів розроблено, виготовлено і впроваджено у виробництво модульну кабіну машиніста електровоза ЕП20 з СПБ.

У написаних в співавторстві публікаціях [1 – 8, 9, 11, 12, 14, 15], що відображають основні результати дисертації, автору належать: в [1] – результати аналізу сучасних світових тенденцій у вирішенні проблеми пасивної безпеки локомотивів; в [2] – основні вимоги до розробки ППЕ; в [3] – методика та аналіз результатів математичного моделювання НДС елементів конструкції силового пояса каркаса кабіни без СПБ при ударах; в [4, 8] – основні вимоги до пасивної безпеки електровоза, розроблена конструкція модульної кабіни машиніста електровоза ЕП20 з СПБ; в [5, 7, 14] – реалізація розроблених технічних рішень; в [6, 12] – аналіз результатів НДС елементів конструкції кабіни машиніста при зіткненні електровоза з мобільним транспортним засобом; в [10] – п. 5 формули винаходу; в [11] – результати аналізу НДС елементів конструкції кабіни машиніста електровоза ЕП1М при ударах; в [15] – рекомендації в проект Міждержавного стандарту.

**Апробація результатів дисертації.** Основні ідеї, положення та результати дисертаційної роботи представлено і обговорено на 8 міжнародних наукових і науково-практичних конференціях: 70 і 73 Міжнародних науково-практичних конференціях “Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту” (2010 р. і 2013 р.) [11, 15]; ювілейній XX Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми розвитку рейкового транспорту” (2010 р.) [4]; V Міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології” (2011 р.) [12]; II Міжнародній партнерській конференції EuroTrain “Проблеми рухомого складу: шляхи вирішення через взаємодію державного і приватного секторів” (2011 р.) [13]; XXI Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми розвитку рейкового транспорту” (2011 р.) [7]; XIII Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми механіки залізничного транспорту” (2012 р.) [14]; 9 Міжнародному Симпозіумі “Пасивна безпека 2013 – Пасивна безпека залізничних екіпажів та безпечні інтер’єри” (2013 р., м. Берлін) [8]. У повному обсязі дисертаційну роботу розглянуто на засіданнях об’єднаного семінару відділів 7 і 14 ІТМ НАНУ і ДКАУ, на Вченій Раді ІТМ НАНУ і ДКАУ, міжкафедральному науковому семінарі ДНУЗТу.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 15 наукових робіт (з них 2 роботи без співавторів), в том числі 8 статей у спеціалізованих наукових виданнях, що входять до Переліку фахових видань України, 1 стаття у виданні Технічного Університету Берліна (Германія), 5 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях, 1 патент України на корисну модель.

**Структура і об'єм дисертації.** Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Основний текст дисертації викладено на 134 сторінках, включаючи 2 таблиці, 1 з яких розміщено на окремій сторінці, 73 рисунка, з яких 46 рисунків розміщено на 30 окремих сторінках. Список використаних джерел включає 114 публікацій на 15 сторінках, 3 додатки – на 16 сторінках. Повний обсяг дисертації – 165 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** показано актуальність роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, їх зв'язок з науковими програмами, указано методи досліджень, достовірність отриманих результатів, визначено наукову новизну дисертації, практичне значення та особистий внесок автора, наведено данні про апробацію результатів роботи і публікації.

**У першому розділі** приведено результати аналізу нормативної бази, що регламентує пасивну безпеку локомотивів в країнах ЄС і СНД. Пасивна безпека європейських пасажирських локомотивів з 2008 р. регламентується стандартом EN 15227. В Україні нормативна база з пасивного захисту пасажирських локомотивів поки відсутня, але на теперішній час розробка основних вимог до їх пасивної безпеки з визначенням тестових розрахункових сценаріїв зіткнень та відповідних перешкод є актуальною і спільною проблемою на просторі залізниць з шириною колії 1520 мм. В Російській Федерації (РФ), орієнтуючись на стандарт EN 15227, розроблено та введено в дію “Технічні вимоги до системи пасивної безпеки рухомого складу для пасажирських перевезень залізницями колії 1520 мм” (перша редакція у 2010 р., друга – у 2011 р. ), а також розробляється міждержавний стандарт “Креш-системи аварійні залізничного рухомого складу для пасажирських перевезень. Технічні вимоги і методи контролю”, у якому передбачається врахувати суттєві відмінності в існуючих нормативних вимогах до розробки конструкцій локомотивів, в ударно-тягловому обладнанні та у статистиці аварійних зіткнень на залізницях країн СНД та ЄС.

На основі проведеного патентно-бібліографічного пошуку дано огляд існуючих технічних рішень з пасивного захисту локомотивів при аварійних зіткненнях з перешкодою. Встановлено, що пасивний захист пасажирського локомотива, обладнаного роздільними тягово-зчіпними і ударними пристроями, організовано так, що основну частину енергії аварійного зіткнення із залізничним рухомим складом поглинають креш буфера і розташовані за ними жертвні елементи, закріплені в

кінцевих частинах рами локомотива. Конструкція каркаса кабіни машиніста, як правило, має посилену лобову стінку, жертвовну зону і зону безпеки. Пасивний захист локомотива з об'єднаними ударно-тягловими приладами передбачає наявність автозчепних пристроїв, що зсуваються назад (push-back coupler), багаторівневої системи ППЕ, жертвовної зони та зони безпеки в конструкції каркаса кабіни машиніста. На основі результатів проведеного аналізу обґрунтовано необхідність розробки локомотивів нового покоління для залізниць колії 1520 мм з ефективними системами активної та пасивної безпеки. Специфіка таких локомотивів визначається наявністю: автозчепних і протипідйомних пристроїв, що забезпечують роботу СПБ при аварійних зіткненнях; жертвовних елементів і жертвовних зон для поглинання енергії зіткнення; зони безпеки для виживання та евакуації локомотивної бригади. Обґрунтовано доцільність розробки за допомогою сучасних технологій математичного моделювання принципово нової модульної кабіни машиніста швидкісного пасажирського локомотива з СПБ. Для цього проведено аналіз основних підходів до дослідження динаміки і напружено-деформованого стану елементів конструкцій залізничних екіпажів при штатних і позаштатних навантаженнях.

На даний час накопичено великий досвід, створено наукову базу і розроблено досить ефективні методи для дослідження динамічної навантаженості та міцності конструкцій рухомого складу залізниць при експлуатаційних навантаженнях. Значний вклад у створення науково-методичного забезпечення та розв'язок зазначених задач внесли роботи вчених ДНУЗТу, ІТМ НАНУ і ДКАУ, СУНУ, ДП “УкрНДІВ”, ДЕУТУ, ДП “ДНДЦЗТУ”, УкрДАЖТу, ДонІЗТу, а також БДТУ, ВНДІЗТу, МДУШСу, МПТУ, ПДУРСу, РДУРСу, ВАТ “ВНДКТІ”, РІЗТу. Основи сучасних методів розрахунку, проектування та випробувань залізничних екіпажів закладено Є. П. Блохіним, Г. І. Богомазом, Б. Є. Боднарем, Ю. П. Бороненко, М. Ф. Вериго, С. В. Вершинським, В. Д. Дановичем, А. В. Донченко, О. Л. Голубенко, Ю. В. Деміним, А. О. Камаєвим, Б. Г. Кеглиним, М. Б. Кельріхом, М. Л. Коротенко, В. С. Коссовим, С. А. Кострицею, В. М. Котурановим, В. А. Лазаряном, Л. А. Манашкіним, С. В. Мямліним, Н. Ю. Науменко, Н. М. Найшем, Л. М. Никольським, Е. С. Оганьяном, Д. Ю. Погореловим, В. А. Симоновим, М. Б. Соболевскою, І. Ю. Хижою, В. Ф. Ушкаловим, І. І. Челноковим, Ю. М. Черкашиним та іншими. Питання дослідження НДС елементів конструкцій залізничних екіпажів з СПБ при наднормативних ударних навантаженнях в країнах СНД тільки починають розглядатися, проте в закордонних країнах теоретичні та експериментальні дослідження з пасивного захисту рухомого складу залізниць з іншої шириною колії активно проводяться з початку 90-х років минулого століття. Істотний внесок у вирішення проблеми пасивного захисту залізничних екіпажів внесли фахівці компаній Alstom, Bombardier Transportation, Dellner, Siemens, Voith Turbo, Amtrak, PESA та ряду інших наукових і виробничих організацій. Однак, незважаючи на досить великий досвід проведення наукових досліджень в галузі динаміки рухомого складу, що

працює в експлуатаційних умовах, в країнах СНД практично відсутні методики, що дозволяють шляхом математичного моделювання оцінити НДС елементів конструкції локомотива з СПБ, враховуючи специфіку пружно-пластичного деформування жертвних елементів при наднормативних ударних навантаженнях. Спираючись на світовий досвід, обґрунтовано актуальність і доцільність розробки науково-методичного забезпечення і скінченно-елементних математичних моделей для дослідження НДС елементів конструкції каркаса кабіни машиніста локомотива з СПБ при статичних нормативних навантаженнях та при наднормативних ударах, що характеризують тестові сценарії аварійних зіткнень на залізницях колії 1520 мм.

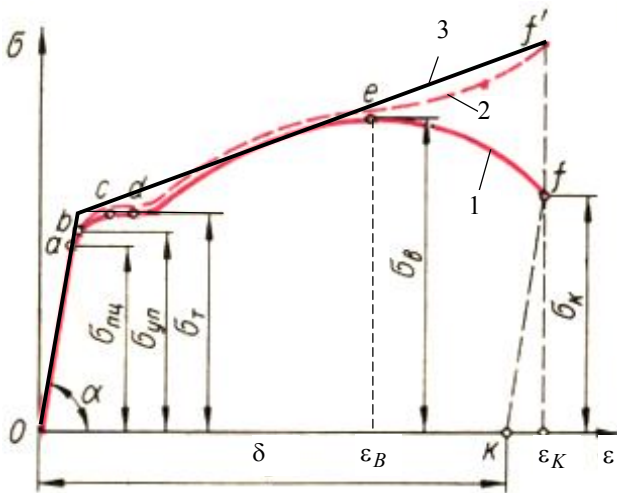
У другому розділі приведено розроблене науково-методичне забезпечення для дослідження НДС елементів конструкцій каркаса кабіни машиніста локомотива з СПБ при статичних і ударних навантаженнях, яке включає створення за допомогою засобів автоматизованого конструювання тривимірної геометричної моделі з необхідним рівнем деталізації досліджуваної конструкції; імпортування геометричної моделі в програму, що представляє собою багатоцільовий пакет для вирішення за допомогою МСЕ складних задач механіки деформованого тіла; створення скінченно-елементної математичної моделі; розв'язок поставленої задачі статички або динаміки; аналіз результатів і перевірка їх достовірності. Оцінка НДС елементів досліджуваних конструкцій при наднормативних ударах здійснюється в результаті розв'язання задачі теорії пластичності при заданих початкових і граничних умовах з урахуванням нелінійних співвідношень між деформаціями і переміщеннями (геометричної нелінійності), між напруженнями і деформаціями (фізичної нелінійності), нелінійної залежності межі плинності сталі від швидкості деформації, змінної контактної взаємодії між елементами розглянутої механічної системи тіл, що співударяються.

У загальному вигляді НДС елементів конструкції при ударі описується системою нелінійних диференціальних рівнянь

$$M\ddot{U} + D(\sigma, U) = Q, \quad (1)$$

де  $M$  – узгоджена матриця мас;  $D$  – функція, що залежить від тензора напружень  $\sigma$  і вектора переміщень  $U$ ;  $Q$  – вектор узагальнених сил у вузлах, обумовлений поверхневими контактними силами, які характеризують дію одного тіла на інше, тобто це дискретний еквівалент контактних сил.

Для визначення початку появи пластичних деформацій використано критерій Мізеса. Для опису пружнопластичних властивостей матеріалу при ударних впливах використано інкрементальну модель пластичності в формулюванні Крига і Кея, засновану на білінійній апроксимації істинної діаграми розтягування з урахуванням кінематичного зміцнення (рис. 1).



$\sigma$  – умовна напруга;  
 $\varepsilon$  – відносне подовження;  
 $\sigma_{пц}$  – межа пропорційності;  
 $\sigma_{уп}$  – межа пружності;  
 $\sigma_T$  – межа плинності;  
 $\sigma_B$  – межа міцності;  
 $\sigma_K$  – умовна напруга в момент розриву зразка;  
 $\varepsilon_B, \varepsilon_K$  – відносні подовження, що відповідають  $\sigma_B, \sigma_K$ ;  
 $\delta$  – відносне подовження після розриву;  
 $tg(\alpha) = E_e$  – модуль Юнга.

1 – умовна діаграма; 2 – істинна діаграма;  
 3 – білінійна апроксимація істинної діаграми

Рисунок 1 – Типові діаграми розтягування маловуглецевої сталі

Точка перелому такої двохланкової кусково-лінійної кривої відповідає динамічній межі плинності, яка залежить від швидкості деформації. Моделювання нелінійної характеристики матеріалу засновано на використанні істинної діаграми розтягування. Виходячи з гіпотези про незмінність об'єму при пластичній деформації, істинна напруга та істинне відносне подовження визначаються за формулами

$$s = \frac{F_e}{A} = \sigma \cdot (1 + \varepsilon); \quad e = \int_{l_0}^{l_0 + \Delta l} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon); \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (2)$$

де  $F_e$  – розтягувальне зусилля;  $A$  – площа поперечного перерізу зразка в поточний момент випробувань;  $\Delta l$  – прирощення довжини зразка в процесі розтягування;  $l_0$  – початкова довжина зразка.

Згідно інкрементальної моделі пластичності в формулюванні Крига і Кея

$$s = s_d + E_{pl} e_{pl}; \quad e_{pl} = \int de_{pl}; \quad de_{pl} = de - de_y; \quad (3)$$

$$E_{pl} = \frac{E_e \cdot E_T}{E_e - E_T}; \quad E_T = \frac{E_h \cdot E_e}{E_h + E_e}; \quad E_h = \frac{s_B - s_T}{e_B - \frac{s_T}{E_e}}; \quad (4)$$

$$e_B = \ln(1 + \varepsilon_B); \quad s_T \approx \sigma_T; \quad s_B = \sigma_B \cdot (1 + \varepsilon_B), \quad (5)$$

де  $s_d$  – істинна динамічна межа плинності, яка визначається з урахуванням впливу швидкості деформації на механічні властивості матеріалу конструкції при ударі,  $E_e$  – модуль Юнга;  $E_{pl}$  – модуль зміцнення;  $e_{pl}$  – істинна пластична деформація;  $e_y$  – істинна пружна деформація.

Для визначення  $s_d$  використовується залежність Саймондса-Купера

$$s_d = s_T \left( 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right) = k s_T; \quad k = 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}}, \quad (6)$$

де  $C$  и  $P$  – коефіцієнти зміцнення сталі;  $\dot{\epsilon}$  – швидкість деформації при динамічному навантаженні;  $k$  – динамічний коефіцієнт зміцнення сталі.

При розробці скінченно-елементної моделі для аналізу нелінійного деформування елементів конструкції каркаса кабіни з СПБ при ударі використано елементи пластин з 3 або 4 вузлами, кожен з яких має по 3 лінійних і кутових переміщення, швидкості і прискорення відносно осей вузлової системи координат. Ці елементи дозволяють враховувати мембранні та згинальні пластичні деформації. Схема контактної взаємодії між дотичними поверхнями прийнята у формі “поверхня до поверхні”.

Рішення даної задачі зводиться до чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь руху (1) при заданих початкових і граничних умовах. При розв’язанні задачі розглядаються лінійзовані форми цих рівнянь відносно малих прирощень, накладених на поточний рівноважний стан. Рівняння руху у прирощеннях мають вигляд

$$M\Delta\ddot{U} + (K_c + G(\sigma) + R(\sigma))\Delta U = \Delta Q, \quad (7)$$

де  $K_c$  – матриця жорсткості;  $G(\sigma)$  – матриця геометричної жорсткості;  $R(\sigma)$  – матриця пластичної жорсткості;  $\Delta U$  – вектор прирощення переміщень;  $\Delta Q$  – вектор прирощення навантажень.

Отримана система диференціальних рівнянь руху великої розмірності вирішується за допомогою методу послідовних навантажень, заснованого на поєднанні чисельного інтегрування з ітераційним коригуванням результатів після кожного кроку за часом. Для зниження нев’язок до допустимих величин використовується ітераційна процедура методу Ньютона-Рафсона. В результаті розв’язку задачі визначається НДС елементів дискретної системи в кожний момент часу.

Адекватність і достовірність результатів, отриманих за допомогою розробленого науково-методичного забезпечення, підтверджено шляхом задовільного узгодження результатів розрахунку деформування жертвних елементів у вигляді перфорованих трубчастих конструкцій при поздовжніх ударах з малою швидкістю (0,01 м/с), з експериментальними даними по статичному стиску відповідних дослідних зразків (рис. 2 – 3).

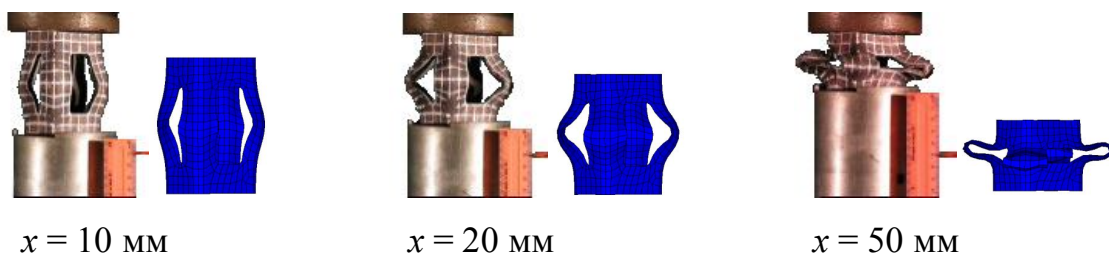


Рисунок 2 – Порівняння експериментальних даних і результатів розрахунку процесу деформування перфорованої труби при стисканні

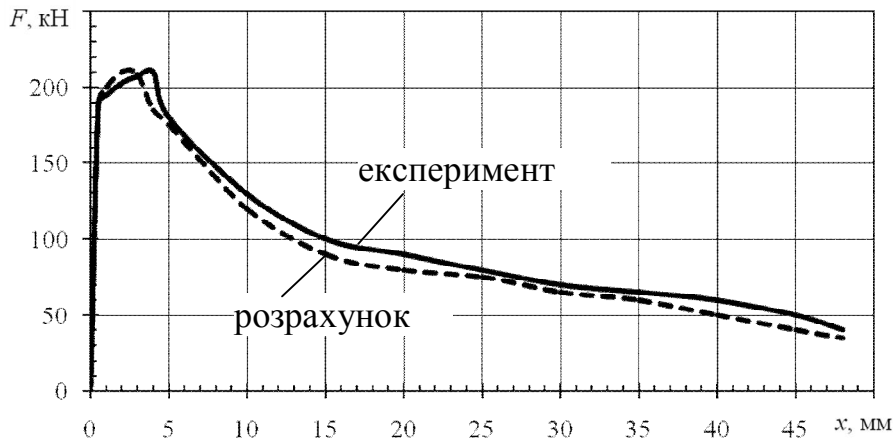


Рисунок 3 – Діаграми деформування перфорованої труби при стисканні

У третьому розділі наведено результати математичного моделювання НДС елементів конструкції силового пояса каркаса кабіни машиніста локомотива без СПБ при ударах різної інтенсивності за допомогою розробленого науково-методичного забезпечення, опис якого дано у розділі 2. Встановлено, що для пасивного захисту локомотива при аварійному зіткненні з перешкодою необхідні суттєві зміни традиційної силової схеми каркаса кабіни машиніста.

Використовуючи успішний досвід створення локомотивів сімейства TRAXX компанією Bombardier Transportation, розроблено вимоги до пасивної безпеки швидкісного пасажирського локомотива для залізниць колії 1520 мм:

- локомотив повинен бути обладнаним ударно-тяговими пристроями, які не перешкоджають роботі СПБ при аварійних зіткненнях;
- конструкція рами кузова локомотива повинна без втрати її загальної несучої здатності забезпечити ефективну роботу СПБ при тестових сценаріях зіткнень;
- основне поглинання енергії удару повинно відбуватися за рахунок пластичної деформації ППЕ в кінцевих частинах рами кузова;
- принципово нова конструкція каркаса кабіни машиніста повинна включати такі елементи СПБ: посилена лобова стінка, спеціальна жертвна зона і зона безпеки;
- при зіткненні в першу чергу повинні руйнуватися ППЕ і жертвна зона кабіни;
- за рахунок роботи СПБ має бути забезпечене поглинання 2 МДж кінетичної енергії удару без перевищення допустимого рівня 5g поздовжнього прискорення в зоні безпеки зі збереженням простору довжиною не менше 750 мм для виживання локомотивної бригади.

Згідно вищевказаних вимог до пасивної безпеки локомотива розроблено конструктивно-компонувальну схему кабіни з елементами СПБ, до складу якої входять два ППЕ в кінцевій частині рами кузова; жорстка антипроникаюча лобова стінка, жертвна зона в передній частині кабіни, зона безпеки в задній частині кабіни (рис. 4).

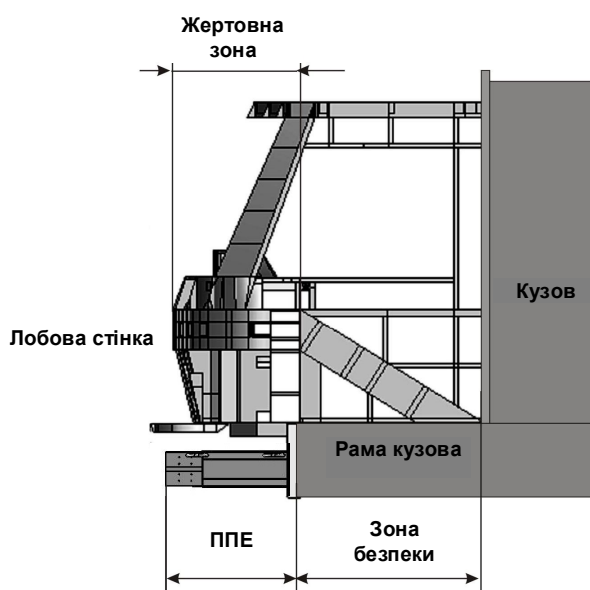


Рисунок 4 – Конструктивно-компонувальна схема кабіни з СПБ

Побудовано концептуальні діаграми деформування елементів СПБ при ударі. Визначено вимоги до ППЕ. В результаті комплексу проведених теоретичних досліджень з використанням науково-методичного забезпечення, опис якого дано у розділі 2, розроблено і запатентовано конструкцію ППЕ коробчастого типу, що містить стільникові пакети (рис. 5). Визначено параметри ППЕ, при яких енергоємність одного пристрою складає 1,1 МДж при деформації 0,8 м. На випробувальному полігоні у м. Герліц (Німеччина) виконано креш тест експериментального зразка ППЕ (рис. 6) і показано, що результати креш тесту добре узгоджуються з результатами моделювання роботи цього зразка ППЕ при ударі (розбіжність становить близько 5%). Результати креш тесту ППЕ представлено на виставці ІнноТранс 2014 в Берліні.

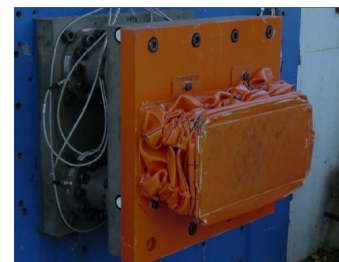
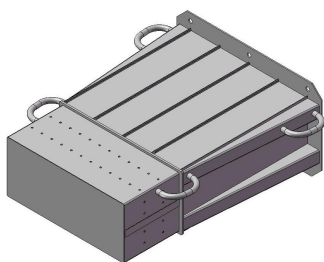


Рисунок 5 – Розроблений ППЕ

Рисунок 6 – Результати креш тесту ППЕ

У четвертому розділі приведено розроблені скінченно-елементні моделі для оцінки міцності конструкцій каркаса кабіни з жертовною зоною при статичному поздовжньому навантаженні на лобову стінку, а також для аналізу нелінійного деформування конструкцій каркаса при ударах за тестовими сценаріями зіткнень. Зіткнення локомотива з перешкодою розглядається як випадок непружного зіткнення двох тіл, при якому частина енергії удару витрачається на деформування тіл, що співударяються, а інша частина енергії переходить у кінетичну енергію їх

спільного руху із загальною швидкістю. Для визначення енергії, витраченої на пластичну деформацію тіл розглядається удар тілом (бойком), що характеризує перешкоду, у нерухому конструкцію кабіни машиніста локомотива з СПБ.

Згідно “Технічних вимог до системи пасивної безпеки ...” розглянуто такі тестові сценарії:

– сценарій 1: зіткнення на переїзді зі швидкістю 72 км/год локомотива з мобільним транспортним засобом (МТЗ), що є великогабаритною недеформованою перешкодою масою 10 т (циліндр діаметром 3 м і довжиною 4 м, розташований на рівні 0,5 м над рівнем головки рейки або вертикальна стінка  $2,2 \times 4$  м);

– сценарій 2: зіткнення локомотива зі швидкістю 36 км/год з вантажним вагоном масою 80 т (вагон у вигляді недеформованої стінки  $4 \times 4$  м).

Схеми взаємодії каркаса кабіни і ППЕ з бойком при ударах за розглянутими тестовими сценаріями зіткнень приведено на рис. 7 – 8.

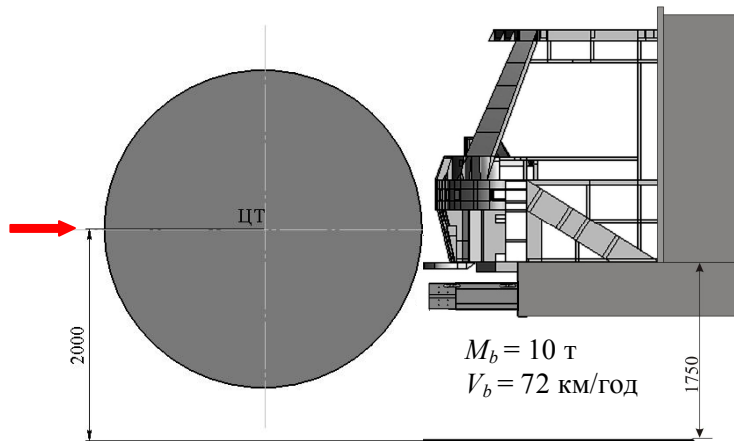


Рисунок 7 – Схема взаємодії каркаса кабіни і ППЕ з бойком при тестовому сценарію 1 (перешкода у вигляді циліндра)

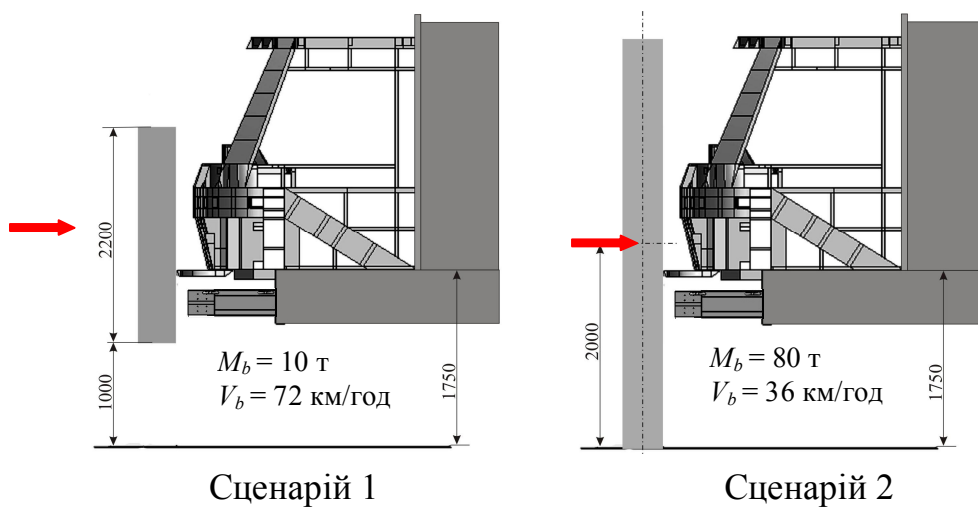


Рисунок 8 – Схеми взаємодії каркаса кабіни і ППЕ з бойком при тестових сценаріях зіткнень (перешкода у вигляді стінки)

Скінченно-елементні схеми для аналізу особливостей нелінійного деформування базової та доопрацьованої конструкцій каркаса кабіни при наднормативних ударах, а також для оцінки міцності конструкцій каркаса кабіни при статичному поздовжньому навантаженні на елементи лобової стінки приведено на рис. 9.

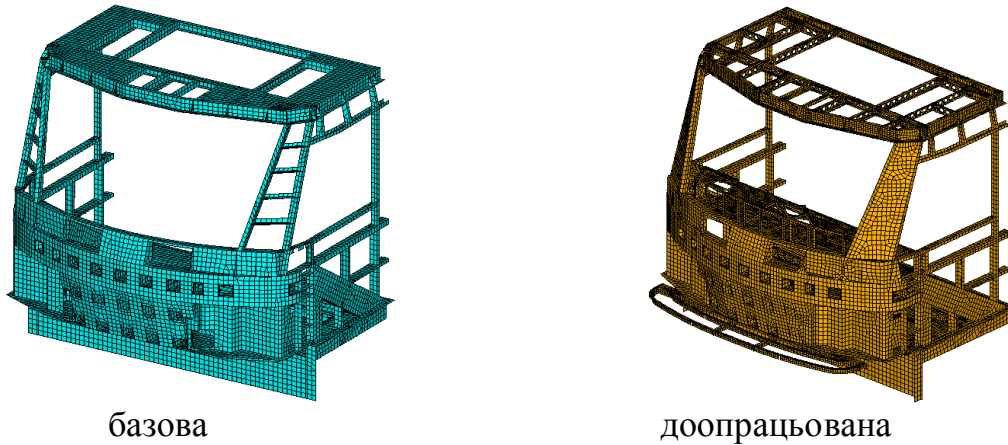


Рисунок 9 – Скінченно-елементні схеми конструкцій каркаса кабіни

У п'ятому розділі наведено результати дослідження НДС елементів базової конструкції каркаса кабіни, в тому числі з урахуванням ППЕ, при ударах за сценарієм 1 (зіткнення з МТЗ у вигляді недеформованого циліндра) і сценарієм 2 (зіткнення з вантажним вагоном у вигляді недеформованої стінки). Показано, що тільки при ударі за сценарієм 2 базова конструкція каркаса відповідає вимогам до пасивної безпеки швидкісного пасажирського локомотива (див. розділ 3). Виконані дослідження послужили підставою для обґрунтованого введення змін у “Технічні вимоги до системи пасивної безпеки ...” 2010 г. з метою заміни моделі МТЗ на недеформовану стінку в новій редакції “Технічних вимог ...” 2011 р.

Проведено доопрацювання базової конструкції каркаса кабіни з метою зниження її ваги та забезпечення міцності згідно нормативних вимог. Результати розрахунків НДС елементів доопрацьованої конструкції каркаса кабіни і ППЕ при ударі згідно сценарію 1 показано на рис. 10 – 12.

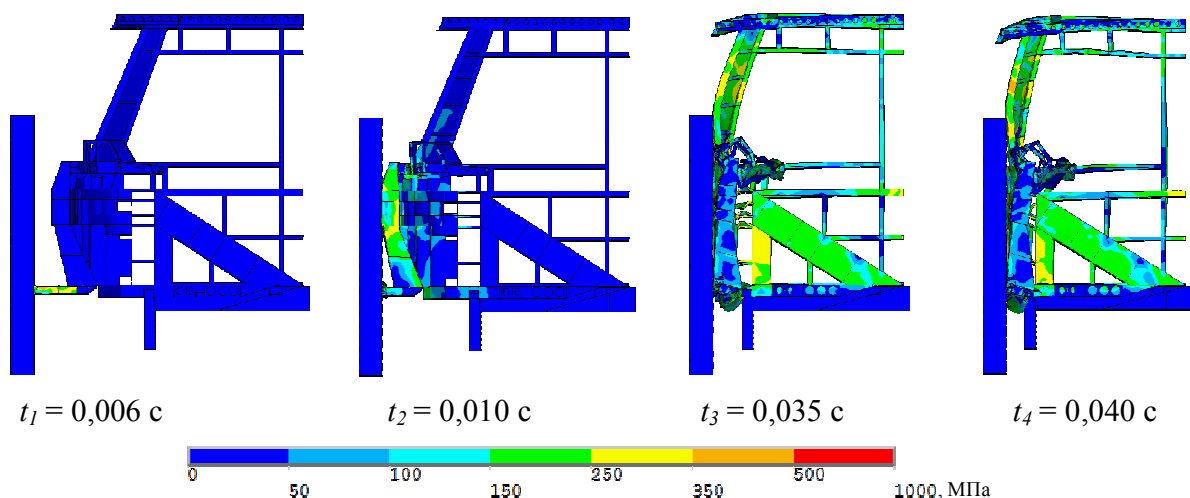


Рисунок 10 – НДС елементів конструкції каркаса у різні моменти часу (сценарій 1)

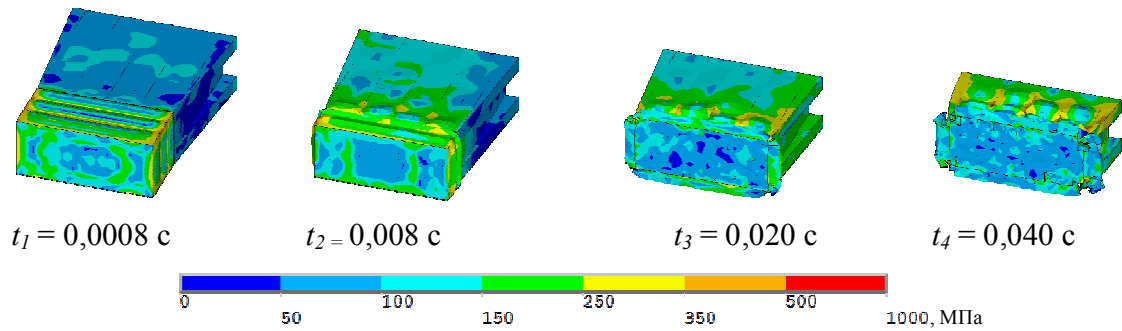


Рисунок 11– НДС елементів конструкції ППЕ у різні моменти часу (сценарій 1)

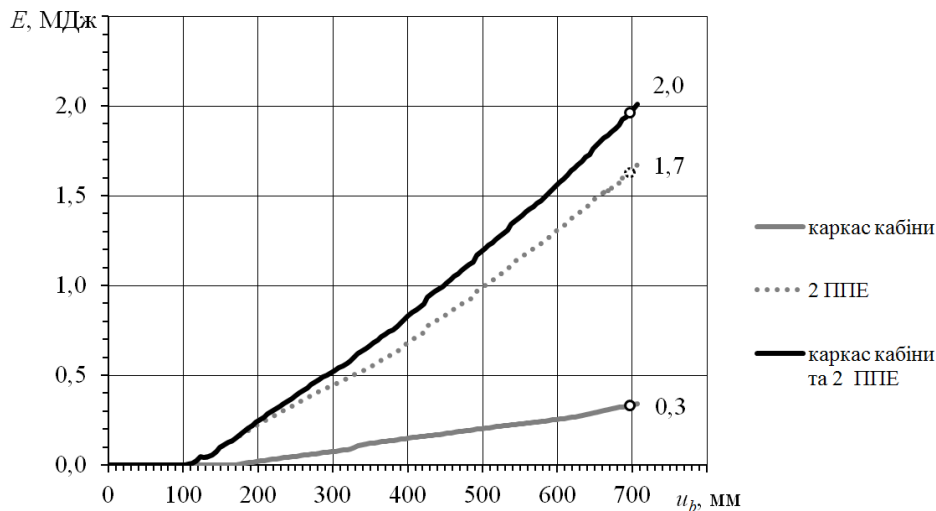


Рисунок 12 – Діаграми енергопоглинання при ударі (сценарій 1)

Виконано аналіз НДС елементів доопрацьованої конструкції каркаса при ударних навантаженнях за тестовим сценарієм 2 зіткнення з вантажним вагоном. Встановлено, що при ударі відбувається контрольоване пластичне деформування ППЕ і жертвової зони каркаса кабіни. В результаті спільної деформації жертвової зони каркаса кабіни і двох ППЕ в аварійній ситуації поглинено кінетичну енергію близько 2,1 МДж (1,8 МДж за рахунок деформації 2-х ППЕ і 0,3 МДж за рахунок деформації жертвової зони кабіни). У зоні безпеки зберігається простір більше 750 мм, а рівень поздовжнього прискорення в ній не перевищує допустимого значення 5g. Сила, діюча на раму кузова локомотива, не перевищує значення, допустимого розробленими вимогами до пасивної безпеки локомотива.

Результатами скінченно-елементного моделювання НДС елементів доопрацьованої конструкції каркаса кабіни при статичному поздовжньому навантаженні 290 кН на елементи лобової стінки підтверджено виконання нормативних вимог щодо міцності цієї конструкції каркаса.

На основі виконаних досліджень розроблено конструкцію модульної кабіни машиніста – окремого збірного модуля з сучасним інтер'єром, укомплектованого необхідним обладнанням і підготовленого для установки на платформу локомоти-

ва, призначеного для руху по колії 1520 мм зі швидкістю до 200 км/год. Перший дослідний зразок модульної кабіни машиніста електровоза ЕП20 з СПБ представлено на виставці ІнноТранс 2012 в Берліні. У 2012 р. введено в експлуатацію електровоз ЕП20 з розробленою кабіною машиніста (рис. 13).



Рисунок 13 – Електровоз ЕП20 з елементами СПБ

У додатку А приведено програму і методику дослідницьких випробувань моделей елементів, призначених для пасивного захисту залізничних екіпажів.

У додатку Б наведено Протокол дослідницьких випробувань моделей елементів, призначених для пасивного захисту залізничних екіпажів в аварійній ситуації.

У додатку В приведено акт впровадження результатів дисертації (акт комісії з приймання результатів ОКР “Кабіна машиніста магістрального електровоза ЕП20”).

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв’язано актуальну науково-прикладну задачу в галузі залізничного транспорту: підвищення пасивної безпеки локомотива при аварійних зіткненнях шляхом створення кабіни машиніста з жертвовою зоною, зоною безпеки і пристроями поглинання енергії.

Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації дисертації полягають у наступному.

1. На основі результатів аналізу світового досвіду з пасивного захисту локомотива при аварійних зіткненнях з перешкодою обґрунтовано необхідність і актуальність розробки з використанням сучасних технологій математичного моделювання принципово нової кабіни машиніста з жертвовою зоною, зоною безпеки і пристроями поглинання енергії.

2. Розроблено основні вимоги до пасивної безпеки швидкісного пасажирського локомотива, побудовано концептуальні діаграми деформування елементів СПБ при наднормативних ударах, що характеризують аварійні зіткнення локомотива з перешкодою на переїзді (сценарій 1) і з вантажним вагоном (сценарій 2).

3. Розроблено конструктивно-компонувальну схему кабіни машиніста з елементами СПБ. Визначено вимоги до ППЕ в кінцевих частинах рами кузова локомотива. Розроблено і запатентовано конструкцію ППЕ коробчастого типу, що містить стільникові пакети. Визначено параметри ППЕ енергоємністю 1,1 МДж. Виконано креш тест ППЕ на випробувальному полігоні у м Герліц (Німеччина) і отримано задовільне узгодження результатів креш тесту з розрахунковими даними.

4. Розроблено науково-методичне забезпечення і скінченно-елементні моделі для дослідження НДС елементів конструкцій каркасів кабін при наднормативних ударах з урахуванням геометричної та фізичної нелінійностей, залежності межі плинності сталі від швидкості деформації, змінної контактної взаємодії елементів конструкцій з перешкодою і між собою. Прийнятність використання розробленого науково-методичного забезпечення підтверджено задовільним узгодженням результатів розрахунків пластичного деформування жертвних елементів у вигляді перфорованих трубчастих конструкцій при поздовжніх ударах з малою швидкістю і даних дослідних випробувань експериментальних зразків цих конструкцій при стисканні.

5. Розроблено скінченно-елементні моделі для аналізу деформування елементів конструкцій каркаса кабіни машиніста локомотива нового покоління з СПБ при поздовжньому статичному навантаженні на елементи лобової стінки.

6. З використанням розробленого науково-методичного забезпечення і скінченно-елементних моделей проведено комплекс досліджень та визначено параметри базової конструкції каркаса кабіни. Виконано аналіз НДС її елементів, в тому числі з урахуванням ППЕ, при ударах за тестовим сценарієм 1 (зіткнення з МТЗ у вигляді недеформованого циліндра) і сценарієм 2. Результати дослідження за сценарієм 1 послужили підставою для введення змін у російські “Технічні вимоги до системи пасивної безпеки ...” 2010 р. з метою заміни моделі МТЗ на недеформовану стінку. Встановлено, що при ударах за сценарієм 2 базова конструкція каркаса кабіни відповідає розробленим вимогам до пасивної безпеки локомотива.

7. Проведено доопрацювання базової конструкції каркаса кабіни з метою зниження її ваги та забезпечення потрібної міцності. Відповідність доопрацьованої конструкції каркаса кабіни нормативним вимогам щодо міцності підтверджено шляхом оцінки НДС її елементів при статичному навантаженні на елементи лобової стінки.

8. Виконано дослідження НДС елементів доопрацьованої конструкції каркаса кабіни з пультом управління і ППЕ при ударах за тестовими сценаріями зіткнень. Показано, що енергія, яка поглинається в результаті спільної деформації жертвної зони каркаса кабіни і двох ППЕ, дорівнює 2 МДж. При цьому в зоні безпеки зберігається простір більше 750 мм для виживання локомотивної бригади, рівень поздовжнього прискорення в цій зоні і сила, що діє на раму кузова локомотива, не перевищують значень, допустимих вимогами до пасивної безпеки локомотива.

9. На основі результатів виконаних досліджень розроблено, виготовлено і впроваджено у виробництво модульну кабіну машиніста електровоза ЕП20 з СПБ. У 2012 р електровоз ЕП20 з розробленою кабіною введено в експлуатацію. На даний час в експлуатації перебувають 42 електровоза серії ЕП20 з елементами СПБ.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ*****Основний***

1. Соболевская М. Б. Пассивная защита локомотива скоростного пассажирского поезда при аварийном столкновении с препятствием / М. Б. Соболевская, С. А. Сирота, И. Б. Теличко // *Техническая механика*. – 2009. – № 3. – С. 31 – 38.
2. Оценка энергопоглощающих свойств элементов, предназначенных для пассивной защиты железнодорожных экипажей при аварийных столкновениях с препятствием / М. Б. Соболевская, И. Б. Теличко, С. А. Сирота, И. К. Хрущ, Д. В. Горобец, Ю. А. Клык // *Техническая механика*. – 2009. – № 4. – С. 28 – 35.
3. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния элементов конструкции кабины машиниста локомотива при ударных воздействиях / М. Б. Соболевская, И. Б. Теличко, И. К. Хрущ, Д. В. Горобец, Ю. А. Клык // *Техническая механика*. – 2010. – Вып. 2. – С. 19 – 28.
4. Ушкалов В. Ф. Разработка кабины машиниста электровоза ЭП20 с системой пассивной безопасности при аварийных столкновениях с препятствием на железнодорожном пути / В. Ф. Ушкалов, М. Б. Соболевская, И. Б. Теличко // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. – 2010. – № 5 (147). – Частина 2. – С. 67 – 72.
5. Математическое моделирование упругопластического деформирования энергопоглощающих элементов системы пассивной безопасности локомотива при аварийном столкновении с препятствием / М. Б. Соболевская, И. Б. Теличко, С. А. Сирота, И. К. Хрущ, Д. В. Горобец, Ю. А. Клык // *Техническая механика*. – 2010. – Вып. 4. – С. 75 – 85.
6. Соболевская М.Б. Оценка напряженно-деформированного состояния элементов конструкции кабины машиниста электровоза с системой пассивной безопасности при его столкновении с мобильным транспортным средством / М. Б. Соболевская, И. Б. Теличко // *Техническая механика*. – 2011. – Вып. 2. – С. 49 – 62.
7. Разработка жертвенных элементов системы пассивной безопасности электровоза ЭП20 / В. Ф. Ушкалов, И. Б. Теличко, М. Б. Соболевская, С. А. Сирота // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. – 2011. – № 4 (158). – Частина 1. – С. 59 – 64.
8. Sobolevska M. Passive safety system of an electric locomotive for high-speed operation on the railways with 1520 mm gauge / M. Sobolevska, I. Telychko // *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” in Berlin on 21 – 22 February 2013*. – 43/2013. – Berlin : IFV Bahn-technik e.V. – 2013. – P. 63 – 80.
9. Теличко И. Б. Разработка модульной кабины машиниста для электровоза нового поколения / И. Б. Теличко // *Залізничний транспорт України* – 2014. – № 3. – С. 3 – 10.

10. Патент на корисну модель 64978 Україна, МПК В 61 G 11/00. Пристрій для поглинання енергії удару / Ушкалов В. Ф., Науменко Н. Ю., Теличко І. Б., Соболевська М. Б., Сирота С. А., Хрущ І. К., Горобець Д. В., Клик Ю. А. – u201104838; заявл. 19.04.2011 ; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22/2011. – 6 с.

### *Додатковий*

11. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкции кабины управления электровоза при ударе в лобовую подоконную часть / М. Б. Соболевская, И. К. Хрущ, Д. В. Горобец, С. А. Сирота, Ю. А. Клык, И. Б. Теличко // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : Тезисы докладов 70 Международной научно-практической конференции 15.04 – 16.04.2010. – Днепропетровск: ДНУЖТ, 2010. – С. 22 – 23.

12. Соболевская М. Б. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкций кабины управления электровоза при столкновении с мобильным транспортным средством / М. Б. Соболевская, И. Б. Теличко // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології” 24 – 25 березня 2011 р. Серія “Техніка, технологія”. К.: ДЕГУТ, 2011. – С. 130 – 131.

13. Теличко И. Б. Перспективные проекты – “пространству 1520” / И. Б. Теличко // Тезисы докладов II Международной партнерской конференции EuroTrain “Проблемы подвижного состава: пути решения через взаимодействие государственного и частного секторов ” 19 – 20 травня 2011 р. – Харьков: Железнодорожное издательство “Подвижной состав”, 2011 г. – С. 48.

14. Система пассивной безопасности скоростного пассажирского электровоза / Н. Е. Науменко, М. Б. Соболевская, С. А. Сирота, И. Ю. Хижа, И. К. Хрущ, Д. В. Горобец, И. Б. Теличко // Тезисы докладов XIII Международной научно-технической конференции “Проблемы механики железнодорожного транспорта” 23 – 25 мая 2012 г. – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2012. – С. 98 – 99.

15. Моделирование работы системы пассивной безопасности электровоза при столкновении с крупногабаритным препятствием на железнодорожном перегоне / М. Б. Соболевская , С. А. Сирота., И. К. Хрущ, Д. В. Горобец, И. Б. Теличко // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : Материалы 73 Международной научно-практической конференции в Днепропетровске 23.05 – 24.05.2013. – Днепропетровск: ДНУЖТ, 2013. – С. 105.

### **АННОТАЦИЯ**

Теличко И. Б. Совершенствование конструкции кабины машиниста для повышения пассивной безопасности локомотива при столкновениях – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – подвижный состав железных дорог и тяга поездов. –

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна Министерства образования и науки Украины, Днепропетровск, 2015.

Диссертация посвящена вопросам повышения пассивной безопасности локомотива при аварийных столкновениях путем создания кабины машиниста с жертвенной зоной, зоной безопасности и устройствами поглощения энергии.

В диссертации на основе результатов анализа нормативной базы и существующих технических решений по пассивной защите локомотивов при аварийных столкновениях обоснована необходимость и актуальность разработки принципиально новой конструкции кабины машиниста пассажирского локомотива с системой пассивной безопасности (СПБ), предназначенного для скоростного движения по железным дорогам с шириной колеи 1520 мм. Показана необходимость разработки основных требований к пассивной безопасности локомотива при столкновениях, научно-методического обеспечения и конечно-элементных моделей для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкции кабины машиниста локомотива с СПБ при статических нагрузках и при сверхнормативных ударах, возникающих в процессе аварийных столкновений локомотива с препятствием.

Разработано научно-методическое обеспечение для исследования НДС элементов конструкций каркаса кабины при сверхнормативных ударах с учетом геометрической и физической нелинейностей, зависимости предела текучести стали от скорости деформации, переменного контактного взаимодействия между элементами рассматриваемой механической системы соударяющихся тел. Приемлемость использования разработанного научно-методического обеспечения подтверждена удовлетворительным согласованием результатов расчетов пластического деформирования жертвенных элементов в виде перфорированных трубчатых конструкций при продольных ударах с малой скоростью и данных испытаний экспериментальных образцов этих конструкций при сжатии.

Разработаны основные требования по пассивной безопасности локомотива для железных дорог колеи 1520 мм, разработана конструктивно-компоновочная схема кабины машиниста локомотива, в состав СПБ которого входят два устройства поглощения энергии (УПЭ) в концевой части рамы кузова, жесткая антипроникающая лобовая стенка, жертвенная зона и зона безопасности.

Разработана и запатентована конструкция УПЭ коробчатого типа, содержащего сотовые пакеты. Выполнен крэш тест экспериментального образца УПЭ при ударе и получено хорошее согласование экспериментальных и расчетных данных.

Разработаны конечно-элементные модели для исследования нелинейного деформирования элементов конструкции каркаса кабины при сверхнормативных ударах. Разработаны конечно-элементные модели для анализа статического деформирования элементов конструкций каркаса кабины машиниста локомотива с СПБ при нормативной продольной нагрузке на элементы лобовой стенки.

С использованием разработанного научно-методического обеспечения и конечно-элементных моделей проведен комплекс исследований и определены параметры базовой конструкции каркаса кабины. Проведено исследование НДС элементов базовой и доработанной конструкций каркаса кабины машиниста с учетом и без учета УПЭ при сверхнормативных ударах согласно тестовым сценариям столкновения локомотива с препятствием на железнодорожном переезде и с грузовым вагоном. Показано соответствие разработанных каркасов кабин требованиям по пассивной безопасности локомотива. Соответствие доработанной конструкции нормативным требованиям по прочности подтверждено путем оценки НДС ее элементов при продольной нагрузке 290 кН на лобовую стенку.

В результате выполненных исследований разработана, изготовлена и внедрена в производство на ОАО «Производственное объединение Новочеркасский электровозостроительный завод» (ОАО «ПО НЭВЗ») конструкция модульной кабины машиниста электровоза ЭП20 с СПБ. Первые опытные образцы разработанной кабины машиниста и УПЭ представлены на выставке ИнноТранс-2012 в Берлине. Результаты краш теста УПЭ представлены на выставке ИнноТранс-2014 в Берлине. Первый электровоз ЭП20 с СПБ запущен в эксплуатацию в 2012 году. В настоящее время в эксплуатации находятся 42 электровоза серии ЭП20 с СПБ.

Ключевые слова: локомотив, модульная кабина машиниста, аварийное столкновение, система пассивной безопасности, устройство поглощения энергии, пластическая деформация, метод конечных элементов.

## АНОТАЦІЯ

Теличко І. Б. Удосконалення конструкції кабіни машиніста для підвищення пасивної безпеки локомотива при зіткненнях – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України, Дніпропетровськ, 2015.

Дисертацію присвячено питанням підвищення пасивної безпеки локомотива нового покоління при аварійних зіткненнях шляхом створення кабіни машиніста з жертвовою зоною та пристроями поглинання енергії.

Розроблено основні вимоги до пасивного захисту пасажирського локомотива нового покоління, конструктивно-компонувальну схему кабіни машиніста локомотива з системою пасивної безпеки (СПБ), до складу якої входять два пристрою поглинання енергії (ППЕ) в кінцевій частині рами кузова, жорстка лобова стінка, жертвна зона і зона безпеки. Розроблено і запатентовано конструкцію ППЕ, виконано краш тест його експериментального зразка. Розроблено науково-методичне забезпечення та скінченно-елементні моделі для дослідження напружено-деформованого стану елементів конструкцій каркаса кабіни при статичному нормативному навантаженні на елементи лобової стінки, а також при наднормати-

вних ударах з урахуванням геометричної та фізичної нелінійностей, залежності межі плинності сталі від швидкості деформації, змінної контактної взаємодії між елементами механічної системи тіл, що співударяються. На основі результатів виконаних досліджень розроблено, виготовлено та впроваджено у виробництво на ВАТ “Виробниче об’єднання Новочеркаський електровозобудівний завод” (ВАТ “ВО НЕБЗ”) модульну кабіну машиніста електровоза ЕП20 з елементами СПБ. Перші дослідні зразки розробленої кабіни машиніста та ППЕ представлено на виставці ІнноТранс 2012 в Берліні, а результати креш тесту ППЕ – на виставці ІнноТранс 2014 в Берліні. У 2012 р. електровоз ЕП20 з СПБ введено в експлуатацію. На теперішній час в експлуатації перебувають 42 електровоза серії ЕП20 з СПБ.

Ключові слова: локомотив, модульна кабіна машиніста, аварійне зіткнення, система пасивної безпеки, пристрій поглинання енергії, пластична деформація, метод скінченних елементів.

## SUMMARY

Telychko I. B. Development of a driver’s cab design for improving of locomotive passive safety in collisions – Manuscript.

Thesis for a candidate’s degree in Engineering Sciences on specialty 05.22.07 – railway rolling stock and train traction. – Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipropetrovsk, 2015.

Thesis is devoted to questions improving passive safety for a new generation locomotive in accidental collisions by developing driver’s cab with a sacrificial zone and energy absorption devices.

The main passive protection requirements for new generation passenger locomotive, a design-layout scheme of driver’s cab for locomotive with passive safety system (PSS) were developed. PSS consists of two energy absorption devices (EAD) in the locomotive frame body end, rigid not-penetration frontal wall, sacrificial and security zones. EAD design was developed and patented. Its experimental sample crash test was successful. The technique and finite-element models to simulate stress-strain state of the cab frame design elements were developed at static longitudinal load on frontal wall elements and at super standard impact taking into account geometric and physical nonlinearities, nonlinear dynamic contact interaction of the locomotive front elements with the impactor, dynamic hardening of the steel depending on the impact speed. As a result of the research modular driver’s cab for electric locomotive EP20 with PSS is designed, manufactured and put into production at “Production Association Novocherkassk Electric Locomotive Plant”. The first prototype of modular driver’s cab and EAD for electric locomotive EP20 introduced at InnoTrans 2012 in Berlin. EAD crash test results introduced at InnoTrans 2014 in Berlin. The first locomotive EP20 with PSS launched in 2012. Currently 42 electric locomotives EP20 with PSS elements are in operation.

Keywords: locomotive, modular driver’s cab, accidental collision, passive safety system, energy absorbing device, plastic deformation, finite element method.

Підписано до друку 22.12.2014 р. Формат 60X90/16.

Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9.

Наклад 100 прим. Зам. № 24

Видавництво “ПФ Стандарт-Сервіс”

Свідоцтво про внесення до державного

реєстру ДК № 3197 від 28.05.2008 р.

м. Дніпропетровськ, вул. Плеханова, 2, оф. 48.