

**МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ імені академіка В. ЛАЗАРЯНА**

ВОЛКОВ ВАЛЕРІЙ АНДРІЙОВИЧ

УДК 625.245.6:62-758.2

**ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВАГОНІВ-ЦИСТЕРН ШЛЯХОМ СТВОРЕННЯ
ЗАХИСНИХ ПРИСТРОЇВ ПІДВИЩЕНОЇ ЕНЕРГОЄМНОСТІ**

05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2006

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі будівельної механіки Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **БОГОМАЗ Георгій Іванович**,
Інститут технічної механіки Національної академії наук України і
Національного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і НКАУ)
завідувач відділу динаміки багатовимірних механічних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **КОРОТЕНКО Михайло Леонідович**,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
(ДПТ), професор кафедри “Теоретична механіка”;

кандидат технічних наук, с.н.с. **ХАЧАПУРІДЗЕ Микола Михайлович**,
Інститут транспортних систем і технологій НАНУ (ТРАНСМАГ),
заступник директора з наукової роботи, завідувач відділу динаміки та
міцності нових видів транспорту.

Провідна установа: Київський університет економіки і технологій транспорту,
Міністерство транспорту та зв'язку України, м. Київ.

Захист відбудеться **“12” жовтня 2006 року о 14¹⁰ годині** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.02 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. акад. В.А. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Автореферат розісланий **“1” вересня 2006 р.**

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

І.В. Жуковицький

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На теперішній час питанням безпеки руху залізничних цистерн з екологічно небезпечними вантажами приділяється велика увага в нашій країні та за її межами. Як свідчить аналіз статистичних даних про аварійні ситуації на вітчизняних і зарубіжних залізницях, значна частина аварій пов'язана з цистернами, що транспортують небезпечні рідкі вантажі широкого асортименту. При аварійній ситуації, що супроводжується сходом вагона з рейок, наїздом вагона на вагон або різні перешкоди, часто виникає саморозчеплення вагонів з наступним пробиванням днища котла цистерни автозчепом сусіднього вагона або довгомірним вантажем, що в ньому перевозиться. Найбільшу небезпеку при цьому представляє розгерметизація котла цистерни через пробивання його днищ, яка супроводжується витіканням, загорянням, вибухом рідкого вантажу та забрудненням навколишнього середовища.

Тенденції світової практики по підвищенню безпеки залізничного транспортування небезпечних вантажів спрямовані на удосконалення конструкцій вагонів-цистерн шляхом обладнання їх днищ системою спеціалізованих засобів захисту від наднормативних ударних навантажень. Аналіз відомих захисних конструкцій торцевих щитів та додаткових накладок на днище показав, що відсутність в них енерговбираючих елементів обумовлює передачу практично всієї енергії аварійного удару на котел цистерни та елементи його кріплення до рами. Крім того, існуючі пристрої захисту днищ мають або малу ефективність, або велику масу, що значно погіршує техніко-економічні характеристики вагона-цистерни. Тому для забезпечення безпеки руху вагонів-цистерн, збереження вантажів і мінімізації наслідків можливих аварій, зокрема пов'язаних з розгерметизацією котлів, актуальною проблемою є розробка і створення нової конструкції вагона-цистерни, обладнаної ефективними захисними пристроями зі зниженою матеріалоемністю і підвищеною енергоемністю.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Проведені у дисертаційній роботі дослідження виконувались за Державною науково-технічною програмою Міністерства освіти і науки України на 1997-2000 рр. “1. Охорона навколишнього природного середовища 1.1 Екологічна безпека України” в межах договору № 2/972-97 від 20.08.97 р. “Розробка проектно-технологічних рішень та засобів захисту залізничних цистерн, що транспортують екологічно небезпечні вантажі” (реєстраційний № 01.01/02066); згідно з планом науково-дослідних робіт Національної академії наук України на 2000-2004 рр. за темою “Дослідження динамічної навантаженості машинобудівних та транспортних систем з урахуванням особливостей пружно-пластичного деформування їх елементів”, постанова Бюро відділення механіки НАН України від 09.12.99, протокол № 11, шифр теми – 1.3.2.260, державний реєстраційний № 0100U001240.

Мета та задачі досліджень. Мета роботи – підвищення безпеки руху вагонів-цистерн, що транспортують екологічно небезпечні вантажі, у тому числі газових цистерн нового покоління, шляхом обладнання днищ котлів захисними пристроями підвищеної енергоємності. Для досягнення поставленої мети необхідно:

- провести аналіз існуючих засобів захисту днищ цистерн від пробивання в аварійній ситуації, розробити технічні вимоги та пропозиції щодо створення перспективної захисної конструкції;
- розробити методики для дослідження з використанням ПЕОМ динамічних навантажень і напруг в елементах конструкцій цистерн, у тому числі обладнаних захисними пристроями, при аварійних ударах у днище;
- дослідити динамічну навантаженість вагонів-цистерн без захисних пристроїв і з різними варіантами захисту днищ;
- вибрати раціональні параметри перспективної конструкції захисних пристроїв;
- виконати експериментальне відпрацювання запропонованого захисного пристрою;
- оцінити ефективність застосування розроблених захисних пристроїв в аварійних ситуаціях.

Об'єкт досліджень – динамічна навантаженість залізничних цистерн, днища котлів яких обладнано захисними пристроями підвищеної енергоємності, при аварійних ударних навантаженнях.

Предмет досліджень – напружено-деформований стан (НДС) елементів конструкцій вагонів-цистерн, обладнаних засобами захисту з енергопоглинаючими елементами, при наднормативних ударах у днище.

Методи досліджень. При розробці засобів захисту і дослідженні методами математичного моделювання навантаженості та напружено-деформованого стану елементів вагона-цистерни з захисними пристроями використано методи скінчених елементів (МСЕ) і чисельного інтегрування. Для дослідження пружно-пластичних деформацій конструкції в рамках деформаційної теорії пластичності застосовано метод змінних параметрів пружності. Відпрацювання запропонованої конструкції захисного пристрою проведено шляхом натурних випробувань вагонів-цистерн, обладнаних засобами захисту днищ, з використанням експериментальних методів.

Достовірність та обґрунтованість приведених у дисертаційній роботі математичних моделей, підходів, наукових положень і результатів обумовлені коректною математичною постановкою задач, використанням сучасних методів математичного моделювання, узгодженням результатів теоретичних досліджень з даними натурних випробувань.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено нові скінченно-елементні математичні моделі для нелінійного динамічного аналізу пружно-пластичного деформування днищ котлів вагонів-цистерн з пристроями їх захисту при аварійних ударах в рамках деформаційної теорії пластичності з урахуванням нелінійної залежності між деформаціями і переміщеннями;
- вперше отримано залежності впливу параметрів різних типів захисних пристроїв на міцність котлів газових цистерн при аварійних ударах;
- створено концепцію, яка дозволяє з заданою точністю вибирати раціональні параметри конструкцій захисних пристроїв, що містять стільникові енерговбираючі елементи.

Практична цінність дисертації полягає в розробці:

- основних вимог до пристроїв захисту днищ котлів вагонів-цистерн від аварійних ударів;
- рекомендацій з вибору раціональних параметрів конструкцій захисних пристроїв з енерговбираючими стільниковими елементами;
- дослідного зразка вагона-цистерни нового покоління, обладнаного захисними торцевими щитами підвищеної енергоємності.

Практичне значення мають методики для дослідження динамічної навантаженості і вибору раціональних параметрів засобів захисту днищ перспективних конструкцій вагонів-цистерн, а також методика оцінки ефективності застосування захисних пристроїв в аварійних ситуаціях. В результаті виконаних досліджень виготовлена, випробувана і впроваджена у виробництво на ВАТ “МЗВМ” конструкція вагона-цистерни моделі 15-9503 АВП, днища котла якої обладнано розробленими торцевими запобіжними щитами, що містять стільникові енерговбираючі елементи.

Особистий внесок здобувача полягає в плануванні і проведенні теоретичних і експериментальних досліджень, аналізі отриманих результатів, розробці наукових положень і висновків. Автором проведено порівняльний аналіз існуючих конструкцій для захисту днищ котлів вагонів-цистерн від аварійних ударів, розроблено вимоги до перспективної захисної конструкції і запропоновано використовувати в ній стільникові енерговбираючі елементи; розроблено методики і проведено аналіз теоретичних і експериментальних досліджень динамічної навантаженості елементів вагонів-цистерн, обладнаних засобами захисту днищ, а також розроблено методику і дано оцінку ефективності використання засобів захисту днищ котлів вагонів-цистерн в аварійних ситуаціях. Під керівництвом автора створено дослідний зразок вагона-цистерни з захисними пристроями.

В публікаціях, що написані у співавторстві та відображають основні результати дисертації, автору належать: у [1,12] – методика математичного моделювання напружено-деформованого стану елементів цистерн, у тому числі з захисними пристроями, при ударі в днище котла; у [2,5,10] – аналіз теоретичних досліджень динамічної навантаженості та НДС елементів конструкцій вагонів-цистерн з захисними пристроями при аварійних ударах; у [3,6,11] – розробка методики та вибір раціональних параметрів пристроїв захисту днищ котлів вагонів-цистерн в аварійній ситуації; у [4] – методика оцінки ефективності застосування захисних пристроїв в аварійних ситуаціях; у [8,9] – методика натурних випробувань захисного пристрою з енерговбираючими елементами на наднормативні та експлуатаційні навантаження, керівництво їх проведенням і аналіз отриманих результатів; у [13,14] – ідея створення перспективної конструкції вагона-цистерни з захисними пристроями підвищеної енергоємності. Робота [7] написана автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні ідеї, положення та результати дисертаційної роботи представлено та обговорено на X Міжнародній конференції “Проблеми механіки залізничного транспорту. Динаміка, надійність та безпека рухомого складу” 24-26 травня 2000 р. в ДІТі, а також на Всеукраїнській науковій конференції “Математичні проблеми технічної механіки” 24 квітня 2001 р. в Дніпродзержинському державному технічному університеті, на Міжнародних наукових конференціях “Питання сучасного матеріалознавства” (Стародубовські читання) 2001 р. і 2002 р. у Придніпровській державній академії будівництва і архітектури (м. Дніпропетровськ), на XI Міжнародній конференції “Проблеми механіки залізничного транспорту. Динаміка, міцність і безпека руху рухомого складу” 26-29 травня 2004 р. в ДІТі. В цілому дисертаційну роботу розглянуто на засіданнях об’єднаного семінару кафедр “Будівельна механіка”, “Теоретична механіка”, “Вагони і вагонне господарство” Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна і відділів Інституту технічної механіки НАН України і НКА України.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 14 наукових праць, у тому числі дев’ять статей у наукових виданнях (за фахом), два патенти на винахід, троє тез доповідей на міжнародних і всеукраїнській конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації – 180 сторінок (основний текст 160 сторінок), 73 рисунка, 14 таблиць, 142 джерела, 1 додаток.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі показано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, їх зв'язок з науковими програмами, визначено методи досліджень, достовірність отриманих результатів, дано загальну характеристику всіх розділів дисертації, визначено її наукову новизну, практичне значення та особистий внесок автора, наведено дані про апробацію результатів і публікації.

У першому розділі приведено результати проведеного на основі патентно-бібліографічного пошуку аналізу існуючих технічних рішень по обладнанню залізничних цистерн засобами захисту від наднормативних ударів в аварійних ситуаціях, визначено основні вимоги до захисних пристроїв і умов їх експлуатації. Відзначено, що розробка засобів захисту повинна базуватися на принципі максимального поглинання кінетичної енергії удару захисним пристроєм за рахунок особливостей його пружно-пластичного деформування і руйнування, з огляду при цьому на габарити конструкцій цистерн нового покоління, умови їх експлуатації та можливості технічного обслуговування. Розробка і вибір раціональних параметрів захисних конструкцій повинні бути виконані на основі попередніх теоретичних досліджень з наступним експериментальним відпрацюванням.

Аналіз досвіду розвитку вагонобудування показує, що значний внесок у дослідження динаміки рухомого складу залізниць внесли роботи вчених із ДІІТу, ІТМ НАНУ і НКАУ, КУЕТТу, ВУНУ, а також ВНДІЗТу, МДУШСя, ПДУШСя, РІЗТу, БДТУ, ДержНДІВа.

Основи сучасних методів розрахунку, проектування та випробувань залізничних екіпажів закладено Є.П. Блохіним, М.Ф. Веріго, С.В. Вершинським, М.В. Вінокуровим, А.М. Годицьким-Цвирко, Л.О. Гра-човою, В.І. Даниловим, О.П. Єршковим, І.П. Ісаєвим, Л.А. Кальницьким, А.А. Камаєвим, С.М. Куценко, І.А. Ковальовим, І.Я. Коганом, М.Л. Коротенко, В.А. Лазаряном, В.Б. Меделем, В.Ф. Ушкаловим, І.І. Челноковим, Ф. Картером, І. Рокаром, А. де Патером.

Істотний внесок у дослідження динаміки залізничних цистерн, вивчення їх міцносних якостей, створення перспективних конструкцій внесено О.П. Азовським, Г.І. Богомазом, Ю.П. Бороненко, В.М. Бубновим, Ю.В. Дьоміним, А.А. Долматовим, М.Б. Кельрихом, Г.В. Костіним, В.М. Котурановим, А.Д. Кочновим, М.М. Кудрявцевим, О.А. Львовим, В.С. Плоткіним, А.О. Радзиховським, Б.С. Ратнером, М.М. Соколовим, О.В. Смоляниновим, В.М. Філіпповим, В.Д. Хусидовим, Ю.М. Черкашиним, Г.Ф. Чугуновим, Л.Ф. Шадуром та іншими.

З виконаного огляду випливає, що, не зважаючи на досить великий досвід проведення наукових досліджень в області динаміки рухомого складу, що працює в умовах нормального функціонування, практично відсутні методики, що дозволяють шляхом математичного моделювання оці-

нити напружено-деформований стан елементів залізничних цистерн з пристроями захисту днищ при аварійних ударах з урахуванням не тільки конструктивних особливостей вагона-цистерни і засобів захисту днищ з енерговбираючими елементами, але і специфіки деформування конструкції при наднормативних динамічних навантаженнях. Оскільки аварійні удари в днище котла, як правило, супроводжуються появою залишкових деформацій у вигляді вм'ятин і навіть можуть призвести до порушення цілісності котла, розв'язок задачі оцінки НДС конструкції з урахуванням пружно-пластичного характеру її деформування необхідно проводити в нелінійній постановці в рамках деформаційної теорії пластичності, використовуючи нелінійну залежність деформацій від переміщень. При цьому доцільно застосовувати метод змінних параметрів пружності.

В другому розділі приведено методику для дослідження методами математичного моделювання динамічної навантаженості і напружено-деформованого стану елементів залізничних цистерн, у тому числі з захисними пристроями, при аварійних ударах в днище котла цистерни автотягачем сусіднього вагона або довгомірним вантажем, що у ньому перевозиться. Для оцінки динамічної навантаженості вагонів-цистерн при наднормативних поздовжніх ударах використано метод скінченних елементів у формі методу переміщень. Для аналізу напруг, що виникають в елементах конструкції цистерни відповідно до розроблених розрахункових схем, задається вектор вузлових сил $F(t)$ і розв'язується система диференціальних рівнянь руху відносно вектора невідомих вузлових переміщень $U(t)$

$$F(t) = M \ddot{U}(t) + C \dot{U}(t) + K U(t). \quad (1)$$

За знайденими шляхом прямого чисельного інтегрування системи рівнянь (1) вузлових переміщеннями визначаються деформації елементів, а за деформаціями – відповідні напруги. З отриманої інформації про зміну з часом вузлових переміщень, напруг і деформацій скінченних елементів вибираються необхідні для міцносних розрахунків максимальні значення зазначених величин.

При використанні квазистатичного підходу розв'язується задача статичного деформування елементів цистерни під дією попередньо знайдених максимальних за рівнем ударних навантажень. При цьому на основі побудованої матриці жорсткості системи K і вектора зовнішніх вузлових сил F розв'язується система алгебраїчних рівнянь

$$F = K U. \quad (2)$$

Для обґрунтування можливості використання квазистатичного підходу проведено порівняння максимальних значень напруг у зоні удару, отриманих шляхом розв'язку задачі динаміки (1)

при імпульсному навантаженні, що характеризує удар, і знайдених з розв'язку задачі (2) під дією статичних сил тієї ж величини у випадку пружного удару в днище цистерни, а також шляхом зіставлення результатів розрахунків з даними експериментальних досліджень.

Для дослідження НДС елементів цистерн при наднормативних ударах, що супроводжуються появою в зоні удару пружно-пластичних деформацій, поряд із МСЕ використано метод змінних параметрів пружності. Відповідно до цього методу розв'язок задачі теорії пластичності зводиться до розв'язку задачі теорії пружності зі змінними параметрами пружності E^* , μ^* , G^* :

$$\sigma_x - \sigma_{cp} = \psi(\varepsilon_x - \varepsilon_{cp}); \quad \sigma_y - \sigma_{cp} = \psi(\varepsilon_y - \varepsilon_{cp}); \quad \sigma_z - \sigma_{cp} = \psi(\varepsilon_z - \varepsilon_{cp});$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2}\psi\gamma_{xy}; \quad \tau_{yz} = \frac{1}{2}\psi\gamma_{yz}; \quad \tau_{zx} = \frac{1}{2}\psi\gamma_{zx};$$

$$\varepsilon_{cp} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z}{3}; \quad \sigma_{cp} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3};$$

– при пружному деформуванні: $\psi = 2G$; $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$;

– при пластичному деформуванні: $\psi = 2G^*$; $G^* = \frac{E^*}{2(1+\mu^*)}$;

$$E^* = \frac{3G^*}{1 + \frac{1-2\mu}{E}G^*}; \quad \mu^* = \frac{1 - \frac{1-2\mu}{E}G^*}{1 + \frac{1-2\mu}{E}G^*}; \quad G^* = \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}; \quad (4)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)},$$

де E, G, μ – постійні параметри пружності: модулі Юнга I-го і II-го роду, а також коефіцієнт Пуассона; σ_i, ε_i – інтенсивності напруг і деформацій ($\sigma_i = \sigma_{\hat{a}\hat{a}\hat{a}}$).

У першому наближенні для оцінки напружено-деформованого стану елементів цистерни вихідними параметрами є значення пружних констант $E^* = E$, $G^* = G$, $\mu^* = \mu$ для всіх скінченних елементів, що моделюють цистерну. Замість фізичних рівнянь в теорії пружно-пластичних деформацій розглядається узагальнений закон Гука і розв'язується задача теорії пружності. В результаті цього в центрі тяжіння кожного скінченного елемента визначаються всі шість компонентів тензорів напруг і деформацій, по яких обчислюються інтенсивності напруг σ_{i1} і деформацій ε_{i1} . Шляхом

порівняння отриманих значень σ_{il} з σ_T (межею плинності) за критерієм Губера-Мізеса-Генки $\sigma_{il} \geq \sigma_T$ визначається область конструкції цистерни, де можлива поява пластичних деформацій (рис. 1).

Рис. 1. Діаграма деформування

Для скінченних елементів з цієї області в наступному наближенні параметри E^*, G^*, μ^* змінюються відповідно до формул (3). В результаті скінченного числа послідовних наближень визначаються необхідні для міцносного розрахунку максимальні значення напруг, що характеризують навантаженість цистерни при аварійному ударі.

Разом з ІТМ НАНУ і НКАУ розроблено скінченно-елементні розрахункові схеми (рис. 2) і математичні моделі для дослідження деформування елементів конструкцій цистерн, у тому числі обладнаних додатковими засобами захисту, при експлуатаційних і аварійних режимах навантаження. При цьому для моделювання обичайки котла використано чотирикутний, а для днищ і опор – трикутний елемент тонкої пластини, описаної рівняннями моментної теорії, фасонні лапи представлено плоскими трикутними елементами мембрани, хребтова і шкворневі балки, а також хомути – балковими скінченними елементами, вертикальні пружні закріплення – безмасовими стержневими елементами, додаткові захисні пристрої на днищах котла – композитними елементами або набором трикутних елементів тонких і товстих пластин. Серед зовнішніх навантажень враховано: власна вага конструкції цистерни і рідкого вантажу, додатковий внутрішній тиск, ударне навантаження, інерційні сили і гідродинамічний тиск, що виникає в результаті гідроудару.

Рис. 2. Скінченно-елементна схема вагона-цистерни

Розроблені методики і математичні моделі використані для визначення зон концентрації напруг і їх максимального рівня, дослідження характеру деформування найбільш навантажених елементів конструкції з урахуванням залишкових деформацій, оцінки навантажень і швидкостей співудару цистерни з вагоном-бойком, при яких можлива поява пластичних деформацій і руйнування елементів цистерни.

Виконано аналіз напружено-деформованого стану вагона-цистерни для перевезення зріджених вуглецево-водневих газів і легкої вуглецево-водневої сировини без захисних пристроїв і з різними варіантами захисту днищ: з додатковими металевими накладками на нижню частину днищ; з жорстко закріпленими на рамі цистерни торцевими щитами у вигляді металевих пластин, підкріплених з боку днищ горизонтальними і вертикальними ребрами жорсткості. Отримано, що у випадку аварійного удару в днище порушення герметичності котлів вагонів-цистерн без захисних при-

строїв і при обладнанні їх днищ накладками товщиною порядку 0,01 м (НДС днища котла показано на рис. 3) може відбутися при зіткненнях зі швидкостями вище 12 км/год.

Рис. 3. НДС елементів цистерни з накладкою на днище при ударі

Використання торцевих щитів підвищує надійність захисту і дозволяє забезпечити цілісність днищ котлів вищевказаних цистерн при швидкостях аварійних зіткнень порядку 20 км/год. Отримано, що рівень енергії, що поглинається при пружному деформуванні щита до його взаємодії з днищем котла (НДС щита показано на рис. 4), досить малий і складає 5 кДж. Взаємодія торцевого щита з днищем котла цистерни супроводжується появою пружно-пластичних деформацій днища при швидкостях удару порядку 4 км/год.

Рис. 4. НДС щита при ударі до взаємодії з днищем котла

Відсутність в розглянутих захисних конструкціях енерговбираючих елементів обумовлює передачу практично всієї енергії аварійного удару на котел цистерни та елементи його кріплення до рами.

В третьому розділі розроблено рекомендації щодо створення засобів захисту днищ котлів залізничних цистерн в аварійних ситуаціях і визначено раціональні параметри захисних пристроїв. Показано, що ефективність існуючих захисних пристроїв у вигляді металевих накладок на днища і торцевих щитів можна істотно підвищити за рахунок удосконалення їх конструкцій шляхом використання стільникових енерговбираючих елементів, що відрізняються зниженою матеріалоемністю і підвищеною енергоемністю. Визначення параметрів стільникового заповнювача (рис. 5), щовходить до складу розглянутих пристроїв, засновано на припущенні, що при деформуванні стільники повинні поглинути максимально можливу кількість кінетичної енергії, який володіють тіла, що співударяються.

Рис. 5. Стільниковий енерговбираючий елемент

Проведено експерименти по статичному стиску під пресом стільникового зразка, у результаті яких визначено критерій для вибору геометричних розмірів поперечного перерізу шестигранного стільникового заповнювача: критичне напруження втрати стійкості σ_{kp} стінки стільникової комірки як шарнірно обпертої пластинки повинне бути не нижче межі плинності

$$\sigma_T \leq \sigma_{kp} = 3,6E_c \left(\frac{\delta_c}{r} \right)^2 \leq \sigma_{bc}, \quad (5)$$

де E_c – модуль пружності матеріалу стільникової комірки; δ_c – товщина листа стільникового заповнювача; r – радіус описаної окружності комірки стільникового заповнювача; σ_T , σ_{bc} – межі плинності та міцності матеріалу стільника.

Звідки

$$\sqrt{\frac{\sigma_T}{3,6E_c}} \leq \frac{\delta_c}{r} \leq \sqrt{\frac{\sigma_{bc}}{3,6E_c}}. \quad (6)$$

З іншого боку, враховуючи особливості роботи захисного пристрою, який повинен руйнуватися до появи вм'ятин на днище, вибір параметрів стільникової комірки захисного пристрою для конкретної моделі цистерни повинен визначатися величиною критичного тиску $P_{kr_c} = 1,54 \frac{\delta_c}{r} \sigma_T$, при якому почнуть м'ятися стільникові елементи. Цей тиск не повинен перевищувати зовнішнього тиску $[p]$, що допускається для днищ котлів вагонів-цистерн, тобто $P_{kr_c} < [p]$.

Визначено раціональні параметри засобів захисту днищ котлів цистерн в аварійних ситуаціях. На рис. 6 показано вплив характеристик захисного пристрою (відношення товщини листа стільникового заповнювача до радіуса описаної окружності комірки стільникового заповнювача в діапазоні $1/40 \div 1/90$ і відношення K/K_0 інтегральної жорсткості підкріпленого зовнішнього листа захисного пристрою до інтегральної жорсткості того ж листа без підкріплень) на НДС днища котла при відносній швидкості співудару 30 км/год. В результаті проведених досліджень запропоновано для вагонів-цистерн, що транспортують зріджені гази, використовувати захисні пристрої у вигляді пакета з двох металевих листів, між якими розташовано стільниковий енерговбираючий заповнювач товщиною не менше 0,08-0,15 м, виготовлений з листів низьковуглецевої сталі. Радіус стільникової комірки повинен бути менше товщини стільникового заповнювача, а відношення товщини листів, що утворюють стільникові елементи, до радіуса стільникової комірки приблизно $1/60$.

Рис. 6. Вплив параметрів захисного пристрою на НДС днища котла

Зовнішній лист захисного пристрою варто підкріплювати таким чином, щоб його інтегральна жорсткість збільшилася приблизно в 4 рази.

Розроблено конструкцію захисного торцевого щита з деформовними стільниковими елементами. Істотною відмінністю запропонованого пристрою від тих захисних конструкцій, що існували раніше, є наявність жорстко закріплених на пластині щита і розташованих між ним і днищем деформовних блоків. При цьому і блоки, і пластини повторюють по конфігурації форму днища. Особливістю запропонованої захисної конструкції є установка вертикальних і горизонтальних ребер на зовнішній стороні щита, а також виготовлення блоків у вигляді стільникової конструкції з жор-

стко з'єднаних між собою гофрованих листів низьковуглецевої сталі. Розрахунки показали, що використання розробленого захисного пристрою зі стільниковими енерговбираючими елементами для розглянутої цистерни дозволяє знизити можливість пошкодження її котла в аварійній ситуації.

Проведено експериментальне відпрацювання запропонованої захисної конструкції за допомогою натурних випробувань вагона-цистерни при аварійному зіткненні його з вагоном-бойком, у якого автозчеп було закріплено на висоті, що дозволяє здійснювати удари в днище котла.

Проведені випробування залізничної цистерни з захисними щитами показали можливість використання захисного щита з енерговбираючими елементами як ефективного засобу захисту днищ котлів вагонів-цистерн при аварійних ситуаціях. Експериментально отримано, що використання в захисних пристроях стільникових елементів, що пластично деформуються, дозволяє пом'якшити ударне навантаження на вагон-цистерну. На рис. 7 показано деформований стан захисної конструкції після зіткнення з вагоном-бойком зі швидкістю 15 км/год.

Рис. 7. Експериментальне відпрацювання захисної конструкції

Виконані експериментальні дослідження підтвердили коректність використаної методики розрахунку і математичних моделей (розбіжність розрахункових і експериментальних даних не перевищує 15 %).

У результаті проведених натурних випробувань конструкцію захисного пристрою було удосконалено, і вибрано параметри захисного щита і стільникових елементів (висота, товщина, радіус комірки) для вагона-цистерни нового покоління, призначеної для транспортування зріджених вуглецево-водневих газів (бутану, пропану та їх сумішей) (рис. 8).

Рис. 8. Вагон-цистерна з розробленими засобами захисту днищ

У *четвертому розділі* методами математичного моделювання проведено дослідження напружено-деформованого стану елементів конструкцій залізничних цистерн для транспортування зріджених вуглецево-водневих газів (бутану, пропану та їх сумішей), обладнаних розробленими торцевими щитами зі стільниковими енерговбираючими елементами, при експлуатаційних режимах навантаження та аварійних ударах. Досліджено можливість зменшення товщини циліндричної обичайки і днищ котла цистерни з 0,024 м до 0,022 м, і дано оцінку впливу внутрішнього тиску парів зрідженого газу на НДС днища котла цистерни. Виконаний аналіз показав, що напруги в основних силових елементах конструкції цистерни для перевезення зріджених вуглецево-водневих газів при експлуатаційних навантаженнях, що характеризують найбільш небезпечний для міцності конструкції I розрахунковий режим, менше допустимих “Нормами...” значень.

В результаті досліджень НДС днища котла та елементів його захисту при ударі в захисний щит, проведених з урахуванням внутрішнього тиску парів зрідженого газу (1,64 МПа) у котлі цистерни, встановлено, що наявність розглянутих засобів захисту днищ котла від пробивання в аварійній ситуації дозволяє зберегти герметичність котла при швидкості співудару 34 км/год.

У цілому встановлено, що вибрані параметри вагонів-цистерн нового покоління для перевезення зріджених вуглецево-водневих газів забезпечують відповідно до “Норм...” необхідну міцність конструкцій в експлуатації, а застосування захисних щитів зі стільниковими енерговбираючими елементами підвищує їх безпеку в аварійній ситуації.

Для оцінки міцності кріплення захисних щитів з енерговбираючими стільниковими елементами при дії експлуатаційних навантажень, проведено випробування цих щитів, установлених на рамі вагона-цистерни для перевезення зріджених вуглецево-водневих газів. Випробування проводилися на випробних дільницях ВЦ “Азовмаштест” у два етапи. На першому етапі було проведено випробування на зіткнення та випробування по скиданню з клинів для визначення характеристик коливання щита. Другий етап містив у собі безпосередньо вібраційні випробування щита. Випробуванням піддавалася цистерна в порожньому стані, тому що цей режим є найбільш несприятливим для забезпечення міцності вузлів кріплення підвісного і навісного обладнання. При проведенні випробувань визначалися: цілісність зварних швів елементів кріплення щита на рамі цистерни; швидкість співудару вагонів і сила удару в автозчеп; напруги в елементах щита і кількість циклів його коливань; власні частоти коливань щита. Експериментальні дослідження міцності кріплення запобіжного щита з енерговбираючими елементами на рамі вагона-цистерни показали, що конструкція кріплення щита забезпечує достатній запас міцності при дії ударних і вібраційних навантажень в експлуатації на термін служби нового вагона-цистерни для перевезення зріджених газів до першого капітального ремонту (10 років). Розроблений захист днищ котла рекомендовано для серійного виробництва.

З урахуванням існуючої нормативно-методичної бази дано оцінку ефективності використання розроблених засобів захисту в аварійних ситуаціях. Запропоновано показником економічної ефективності застосування захисних пристроїв на залізничних цистернах, що перевозять небезпечні вантажі, вважати мінімальний рівень втрат, викликаних аварією. Тоді, економічний ефект від застосування захисних пристроїв можна визначити як різницю повних витрат на ліквідацію наслідків у випадку аварії, що відбулася з цистернами без захисних пристроїв і аналогічної аварії, у яку потрапили цистерни, обладнані засобами захисту днищ від пробивання

$$\Delta I = Y_0 - Y_1, \quad (7)$$

де ΔI – кошти, зекономлені на ліквідацію наслідків аварії цистерн при впровадженні захисних пристроїв; V_O – повні приведені витрати на ліквідацію наслідків аварії цистерн, не обладнаних захисними пристроями; V_1 – повні приведені витрати на ліквідацію наслідків аварії цистерн із захисними пристроями.

Економічний збиток V_O , заподіяний народному господарству в результаті аварії, пропонується визначати як суму локальних збитків

$$V_O = V_3 + V_B + V_A + V_{ЖД} + V_{Г} + V_H, \quad (8)$$

де V_3 – збиток від забруднення земельних ресурсів; V_B – збиток водному господарству; V_A – збиток від забруднення повітряного басейну (атмосфери); $V_{ЖД}$ – збиток, заподіяний залізниці, включаючи відновлення рухомого складу; $V_{Г}$ – збиток від втрати перевезеного вантажу (сировини); V_H – збиток, зв'язаний з підвищенням захворюваності населення.

У випадку, коли аналогічна аварія відбувається з цистернами, обладнаними захисними пристроями, передбачається, що їх використання забезпечує цілісність котлів вагонів-цистерн при аварійних ударах у днища. При цьому зберігається перевезений вантаж і відповідно не наноситься шкода навколишньому середовищу, тобто не відбувається забруднення повітряного басейну, земельних ресурсів і ґрунтових вод. Збиток визначається тільки витратами, пов'язаними з ремонтом залізничного шляху і рухомого складу, а також витратами на виготовлення і наступне відновлення захисних пристроїв. У цьому випадку

$$V_1 = V_{ЖД} + n \times (S_{3Y} + S_{3Y}^*), \quad (9)$$

де S_{3Y} – витрати на виробництво одного захисного пристрою; S_{3Y}^* – витрати на відновлення одного ушкодженого захисного пристрою; n – кількість захисних пристроїв, що підлягають відновленню.

На прикладі аварії, в результаті якої відбулося пошкодження котлів і часткова втрата перевезеного вантажу в трьох цистерн, що транспортують зріджений аміак, фенол і нафтопродукти, показано, що використання захисних пристроїв на цистернах перспективних конструкцій для перевезення небезпечних вантажів є ефективним. Ефективність від застосування захисних пристроїв у даному випадку склала 532721,7 грн.

У додатку приведено акт впровадження результатів досліджень, проведених в рамках даної дисертаційної роботи, а також розрахунок економічного ефекту, отриманого в результаті економії матеріалу від впровадження цистерн для перевезення зріджених газів моделей 15-1519 і 15-9503 АВП зі зменшеною товщиною днищ і обичайок котлів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень вирішено важливу науково-технічну задачу, що забезпечує підвищення безпеки руху вагонів-цистерн для транспортування екологічно небезпечних вантажів, у тому числі газових цистерн нового покоління, шляхом обладнання їх котлів розробленими захисними пристроями підвищеної енергоємності. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації дисертації полягають у наступному.

1. В результаті проведеного аналізу даних про аварійні ситуації на залізничному транспорті встановлено, що значна частина аварій на залізницях пов'язана з цистернами, що транспортують екологічно небезпечні вантажі. Аналіз існуючих конструкцій засобів захисту днищ вагонів-цистерн показав, що їх основним недоліком є мала ефективність захисту або велика маса захисного пристрою. Підвищення ефективності захисту котлів цистерн в аварійній ситуації може бути досягнуте за рахунок використання в конструкціях захисних пристроїв спеціальних енерговбираючих елементів і раціонального вибору їх параметрів. Визначено основні вимоги до пристроїв захисту днищ цистерн в аварійних ситуаціях.

2. Розроблено методику дослідження динаміки і напружено-деформованого стану елементів вагона-цистерни, обладнаного засобами захисту днищ котла при аварійних ударах. Побудовано скінченно-елементні моделі, які дозволяють, на відміну від існуючих, проводити нелінійний динамічний аналіз пружно-пластичного деформування днищ котлів вагонів-цистерн з пристроями їх захисту при аварійних ударах в рамках деформаційної теорії пластичності з урахуванням нелінійної залежності між деформаціями і переміщеннями.

3. Виконано аналіз напружено-деформованого стану вагона-цистерни для перевезення зріджених вуглецево-водневих газів і легкої вуглецево-водневої сировини без захисних пристроїв і з різними варіантами захисту днищ. Показано, що порушення герметичності днищ розглянутих вагонів-цистерн без засобів захисту і при обладнанні днищ накладками товщиною порядку 0,01 м може відбутися при швидкостях співудару з вагоном-бойком вище 12 км/год. Використання для захисту днищ цистерн торцевих щитів підвищує надійність захисту і дозволяє забезпечити цілісність днищ котлів вищевказаних цистерн при швидкостях аварійних зіткнень порядку 20 км/год. Відсутність в розглянутих захисних конструкціях енерговбираючих елементів обумовлює передачу практично всієї енергії аварійного удару на котел цистерни і елементи його кріплення до рами.

4. Для захисту днищ котла рекомендовано пристрій висотою не менше третини діаметра котла і товщиною 100–170 мм, виконаний у вигляді пакета з двох металевих листів, між якими розташований стільниковий енерговбираючий заповнювач. Металеві стільники, товщина яких дорі-

вноє 80–150 мм, варто розташовувати перпендикулярно поверхні щита. Радіус стільникової комірки повинен бути менше товщини шару заповнювача, а відношення товщини листів, що утворюють стільникові елементи, до радіуса стільникової комірки приблизно 1/60.

5. Розроблено конструкцію захисного торцевого щита з деформовними стільниковими елементами і проведено її експериментальне відпрацювання за допомогою натурних випробувань вагона-цистерни при зіткненні його з вагоном-бойком, обладнаним додатковим автозчепом, що дозволяє здійснювати удари в днище котла.

6. В результаті аналізу методами математичного моделювання НДС елементів конструкції вагона-цистерни для перевезення зріджених вуглецево-водневих газів при експлуатаційних і аварійних ударах встановлено, що вибрані параметри вагона-цистерни з урахуванням зниження товщини днищ котла до 0,022 м забезпечують відповідно до “Норм...” необхідну міцність конструкції, а застосування захисних щитів, які містять стільникові енерговбираючі елементи, підвищує її експлуатаційну безпеку. Наявність розглянутих засобів захисту днищ котла від пробивання в аварійній ситуації дозволяє зберегти герметичність котла при швидкості співудару 34 км/год.

7. Експериментальні дослідження міцності кріплення захисного щита з енерговбираючими елементами на рамі показали, що конструкція кріплення щита забезпечує достатній запас міцності при дії ударних і вібраційних навантажень в експлуатації на термін служби нового вагона-цистерни для перевезення зріджених газів до першого капітального ремонту (10 років). Вагон-цистерна, обладнаний торцевими захисними щитами зі стільниковими елементами, впроваджено в серійне виробництво.

8. З урахуванням існуючої нормативно-методичної бази розроблено методику оцінки ефективності застосування захисних пристроїв в аварійних ситуаціях. Запропоновано показником економічної ефективності застосування захисних пристроїв на залізничних цистернах, що перевозять небезпечні вантажі, вважати мінімальний рівень втрат, викликаних аварією. Показано, що використання захисних пристроїв на вагонах-цистернах для перевезення небезпечних вантажів є ефективним.

Список опублікованих робіт автора з теми дисертації

1. Особенности математического моделирования напряженно-деформированного состояния элементов железнодорожных цистерн при сверхнормативных ударных воздействиях в днище / Богомаз Г.И., Волков В.А., Соболевская М.Б., Хрущ И.К. // Математическое моделирование в инженерных и финансово-экономических задачах транспорта. Серия: Транспорт: Сборник научных

работ. – Вып. 5. – Днепропетровск: Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта, 2000. – С. 25-30.

2. 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. – Днепропетровск: Арт-Пресс, 2000. – С. 48-51.

3. Оценка параметров средств защиты днищ котлов железнодорожных цистерн при аварийных воздействиях / Богомаз Г.И., Бубнов В.М., Волков В.А., Соболевская М.Б., Хрущ И.К. // Техническая механика. – Вып. 1. – Днепропетровск: Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, 2000. – С. 135-143.

4. Волков В.А., Богомаз Г.И. Про економічну ефективність засобів захисту залізничних цистерн у аварійних ситуаціях. – Збірник наукових праць Київського інституту залізничного транспорту – Т. 5. – Економіка й управління – Вип. № 1. – Київ: Київський інститут залізничного транспорту, 2001. – С. 44–52.

5. Оценка динамической нагруженности элементов конструкции вагона-цистерны, оборудованного торцевыми щитами, при аварийных соударениях / Богомаз Г.И., Науменко Н.Е., Хижа И.Ю., Волков В.А. // Транспорт: Сборник научных работ Днепропетровского государственного технического университета железнодорожного транспорта. – Вып. 7. – Днепропетровск: Наука и образование, 2001. – С. 32-34.

6. Создание перспективных конструкций железнодорожных цистерн, оборудованных средствами защиты днищ повышенной энергоемкости / Богомаз Г.И., Бубнов В.М., Волков В.А., Соболевская М.Б. // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. – Вып. 12. – Днепропетровск: Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, 2001. – С. 305-307.

7. Волков В.А. Экспериментальная отработка средств защиты котлов железнодорожных цистерн при аварийных ударах в днище // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. Серия: Стародубовские чтения. – Вып. 15. Часть 2. “Строительство”, “Машиностроение”. – Днепропетровск: Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, 2002. – С. 156-158.

8. Расчетно-экспериментальная оценка характеристик предохранительного щита с энергопоглощающими элементами, используемого в качестве амортизатора ударов для вагонов-цистерн / Богомаз Г.И., Волков В.А., Кельрих М.Б., Хрущ И.К. // Сборник научных работ Киевского уни-

верситета экономики и технологий транспорта. Серия “Транспортные системы и технологии” – Вып. 1-2. – Киев: Киевский университет экономики и технологий транспорта, 2003. – С. 157-159.

9. Разработка газовых цистерн нового поколения, оборудованных защитными устройствами повышенной энергоемкости // Волков В.А., Бубнов В.М., Богомаз Г.И., Кельрих М.Б. // Вісник Дніпропетровського Національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна – Вип. 5. – Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – С. 56-60.

10. Определение напряженно-деформированного состояния элементов котла железнодорожной цистерны с устройствами защиты днищ при аварийных воздействиях / Богомаз Г.И., Соболевская М.Б., Хрущ И.К., Бубнов В.М., Волков В.А., Кабачный В.П. // Проблемы механики железнодорожного транспорта. Динамика, надежность и безопасность подвижного состава: Тез. докл. X Международной конференции 24-26.05.2000. – Днепропетровск: ДИИТ, 2000. – С. 159-160.

11. Разработка перспективных средств защиты днищ вагонов-цистерн с использованием методов математического моделирования / Волков В.А., Соболевская М.Б., Хижа И.Ю., Хрущ И.К. // Математические проблемы технической механики: Тез. докл. Всеукраинской научной конференции 23-25 апреля 2001 г. – Днепродзержинск: Днепродзержинский государственный технический университет, 2001. – С. 59.

12. Волков В.А., Бубнов В.М., Богомаз Г.И. Кельрих М.Б. Оценка нагруженности газовых цистерн нового поколения, оборудованных защитными устройствами повышенной энергоемкости, при аварийных ударах в днище // Проблемы механики железнодорожного транспорта. Динамика, прочность и безопасность движения подвижного состава: Тез. докл. XI Международной конференции 26-29.05.2004. – Днепропетровск: ДИИТ, 2004. – С. 62.

13. Декларацийний патент на корисну модель № 3720 Україна, МПК7 В 61 D 5/00. Залізнична цистерна / Волков В.А., Бубнов В.М., Богомаз Г.И., Блохин Е.П., Дятлов О.О., Пшинько О.М., Сирота С.А., Тісенко О.І., Михайлін В.Ф.– ТОВ “Головне спеціалізоване конструкторське бюро вагонобудування”, ВАТ “Маріупольський завод важкого машинобудування”, ВАТ “Азовзагальмаш” – № 2004021252; Заявл. 20.02.2004; Опубл. 15.12.2004; Бюл. № 12, 2004. – 4 с.

14. Патент на полезную модель № 43516 Россия, МПК7 В 61 D 5/00. Железнодорожная цистерна / Волков В.А., Бубнов В.М., Богомаз Г.И., Блохин Е.П., Дятлов А.А., Пшинько А.Н., Сирота С.А., Тисенко А.И., Михайлин В.Ф. – “Головное специализированное конструкторское бюро вагоностроения” (UA), ОАО “Мариупольский завод тяжелого машиностроения” (UA), ОАО “Азовобщемаш” (UA) – № 2004105974; Заявл. 26.02.2004; Опубл. 27.01.2005; Бюл. № 3, 2005. – 4 с.

АННОТАЦИЯ

Волков В.А. Повышение безопасной эксплуатации вагонов-цистерн путем создания защитных устройств повышенной энергоемкости – 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 транспорта и связи Украины, Днепропетровск, 2006.

Диссертация посвящена вопросам повышения безопасности движения вагонов-цистерн, транспортирующих экологически опасные грузы, в том числе газовых цистерн нового поколения, путем оборудования днищ котлов защитными устройствами повышенной энергоемкости.

В диссертации выполнен анализ существующих средств защиты вагонов-цистерн от пробиывания днищ котлов в аварийной ситуации. Установлено, что повышение эффективности защиты может быть достигнуто за счет использования в конструкциях защитных устройств энергопоглощающих элементов, отличающихся пониженной материалоемкостью и повышенной энергоемкостью. Определены основные требования к устройствам защиты днищ цистерн в аварийных ситуациях.

Разработана методика и конечно-элементные модели для динамического анализа упруго-пластического деформирования элементов вагонов-цистерн, оборудованных устройствами защиты днищ котлов, при аварийных ударах в рамках деформационной теории пластичности с учетом нелинейной зависимости между деформациями и перемещениями. Предложенная методика и математические модели позволяют определить зоны концентрации и максимальные значения напряжений, исследовать упругопластический характер деформирования наиболее нагруженных элементов конструкции, оценить уровень нагрузок, а также скоростей соударения цистерны с вагоном-бойком, при которых возможно разрушение элементов вагона-цистерны.

Дана оценка напряженно-деформированного состояния вагона-цистерны для перевозки сжиженных углеводородных газов и легкого углеводородного сырья без защитных устройств и с различными вариантами защиты днищ. Показано, что нарушение герметичности днищ вагона-цистерны без средств защиты и в случае оборудования днищ котла накладками толщиной порядка 0,01 м может произойти при скоростях соударения с вагоном-бойком выше 12 км/ч. Использование торцовых щитов позволяет обеспечить целостность днищ котла при скоростях аварийных столкновений порядка 20 км/ч.

Создана концепция для выбора рациональных параметров защитных конструкций с сотовыми энергопоглощающими элементами, основанная на принципе максимального поглощения кинетической энергии удара за счет особенностей упругопластического деформирования и разрушения сотовых элементов до появления вмятин на днище котла. Проведены исследования и разработаны рекомендации по выбору рациональных параметров перспективных конструкций устройств, содержащих сотовые элементы и предназначенных для защиты днищ котла в аварийной ситуации.

Разработана конструкция защитного устройства в виде закрепленного на раме вагона-цистерны торцового щита с энергопоглощающими элементами. Проведена экспериментальная отработка предложенной защитной конструкции с помощью натуральных испытаний вагона-цистерны при аварийном соударении его с вагоном-бойком, автосцепка которого закреплена на высоте, позволяющей осуществлять удары в днище котла.

В результате анализа методами математического моделирования напряженно-деформированного состояния элементов конструкции вагона-цистерны для перевозки сжиженных углеводородных газов при эксплуатационных и аварийных ударах установлено, что выбранные параметры конструкции и защитных устройств с учетом снижения толщины оболочки котла с 0,024 м до 0,022 м обеспечивают требуемую прочность конструкции в эксплуатации, а применение разработанных защитных устройств повышает безопасность вагона-цистерны в аварийной ситуации и позволяет сохранить герметичность котла при скорости соударения до 34 км/ч.

Создан опытный образец вагона-цистерны с разработанными средствами защиты днищ котла и выполнены экспериментальные исследования прочности крепления предохранительного щита с энергопоглощающими элементами на раме вагона-цистерны. Показано, что конструкция крепления щита обеспечивает достаточный запас прочности при действии ударных и вибрационных нагрузок в эксплуатации на срок службы нового вагона-до первого капитального ремонта.

С учетом существующей нормативно-методической базы разработана методика, проведен расчет и показана эффективность применения разработанного защитного устройства в аварийной ситуации.

В результате выполненных исследований изготовлена, испытана и внедрена в производство на ОАО «МЗТМ» конструкция вагона-цистерны модели 15-9503 АВП, днища котла которой оборудованы разработанными торцовыми предохранительными щитами, содержащими сотовые энергопоглощающие элементы.

Ключевые слова: железнодорожная цистерна, аварийный удар, защитные устройства, энергопоглощающие сотовые элементы, динамическая нагруженность, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.

АНОТАЦІЯ

Волков В.А. Підвищення безпечної експлуатації вагонів-цистерн шляхом створення захисних пристроїв підвищеної енергоємності – 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 транспорту та зв'язку України, Дніпропетровськ, 2006.

Дисертацію присвячено питанням підвищення безпеки руху вагонів-цистерн, що транспортують екологічно небезпечні вантажі, у тому числі газових цистерн нового покоління, шляхом обладнання днищ котлів захисними пристроями підвищеної енергоємності. Розроблено методику та скінченно-елементні моделі для аналізу пружно-пластичного деформування днищ котлів цистерн з пристроями їх захисту при аварійних ударах. В результаті виконаних досліджень виготовлена, випробувана і впроваджена у виробництво на ВАТ “МЗВМ” конструкція вагона-цистерни моделі 15-9503 АВП, днища котла якої обладнано розробленими торцевими запобіжними щитами, що містять стільникові енерговбираючі елементи.

Ключові слова: вагон-цистерна, аварійний удар, захисні пристрої, енерговбираючі стільникові елементи, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів.

SUMMARY

Volkov V.A. The increased of tank-car safe operation by the creation of accident protection devices with improved power consuming. – Manuscript.

Thesis for a candidate's degree in engineering sciences on specialty 05.22.07 - rolling stock of railways and traction of trains. – Dnipropetrovsk V. Lazaryan National university of a railway transport of the Transport and Communication Ministry of Ukraine, Dnipropetrovsk, 2006.

The thesis is devoted to questions of increase of safety of motion of tank-cars for ecologically dangerous cargoes including gas tank-cars of new generation by the equipment of the tank heads by accident protection devices with increased power consuming. The technique and finite element models are developed for the analysis of elastic-plastic deformations of tank-car tank heads with protection devices at emergency impacts. As a result of the executed researches the 15-9503 AVP model tank-car structure

equipped by the developed safety end-wall shields with cellular power-absorbing elements is made, tested and implemented into production by public corporation “Mariupol heavy engineering plant”.

Key words: the railway tank-car, emergency impact, accident protection devices, power-absorbing cellular elements, dynamic loading, stressed-strained state, finite element method.