

УДК 614.841.332

*Грінченко Є.М., канд. техн. наук, заст. нач. каф., НУЦЗУ,  
Гузенко В.А., канд. техн. наук, нач. каф., НУЦЗУ,  
Слізаров О.В., канд. техн. наук, доц., НУЦЗУ,  
Приймаков О.Г., канд. техн. наук, доц., НУЦЗУ*

## **ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІНУ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОТЛА ЗАЛІЗНИЧНОЇ ЦИСТЕРНИ З ПОШКОДЖЕННЯМ ТИПУ ВМ'ЯТИНА**

(представлено д-ром техн. наук Соловйом В.В.)

Розглядається задача визначення показників надійності котла залізничної цистерни з пошкодженням типу вм'ятина з урахуванням нестационарного зовнішнього навантаження з метою запобігання аварійних ситуацій на залізничному транспорті при перевезенні нафтопродуктів

**Ключові слова:** залізниця, цистерна, вм'ятина, аварійна ситуація

**Постановка проблеми.** Для сталого розвитку транспортного комплексу необхідне гармонійне поєднання технічного розвитку рухомого складу та інфраструктури залізниць з розвиненою системою реагування на надзвичайні ситуації, які можуть виникнути при перевезенні небезпечних вантажів.

Особливо небезпечними є надзвичайні події, які супроводжуються пожежами (вибухами) цистерн з легкозаймистими і горючими рідинами та зрідженими вуглеводневими газами, а також розливанням (викиданням) горючих рідин і сильнодіючих отруйних речовин.

Аварії на залізничному транспорті являють собою небезпечні події техногенного характеру, що призводять до загибелі людей, або створюють на об'єкті чи окремій території загрозу життю та здоров'ю людей, призводять до руйнування будівель, споруд, обладнання і транспортних засобів, порушення виробничого або транспортного процесу, або завдають шкоду довкіллю.

Ситуація, що склалася, змушує суттєво посилити контроль за технічним станом ємностей. Важливим питанням, таким чином, є визначення граничних розмірів ушкоджень типу вм'ятина для різних місць виникнення цього ушкодження а також для прогнозування терміну безпечної експлуатації залізничної цистерни в екс-

плуатації, що пов'язана з розгерметизацією її пошкодженого котла.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В процесі експлуатації котли цистерн, що використовуються для транспортування нафти і нафтопродуктів, накопичують ті або інші пошкодження і поступово знижують свої технічні кондиції. Питання фізичного зносу котлів цистерн найфундаментальніше розглядалися в роботах [1-3], питання підвищення надійності використовуваного парку цистерн в роботах [4, 5], а розв'язок задачі надійності об'єктів підвищеної небезпеки з урахуванням нестаціонарності зовнішнього впливу – в роботі [6]. Проте, управлінню надійністю цистерн в експлуатації, що враховує механічні пошкодження, і дозволяє продовжувати терміни корисного використання, з погляду надійності, приділена недостатня увага.

**Постановка завдання та його вирішення.** Основним завданням статті є визначення терміну безпечної експлуатації котлів залізничних цистерн з пошкодженням типу «вм'ятина». Матеріал котла цистерни розглядається як суцільне середовище, що підкоряється законам континуальної механіки. При цьому в кожній точці тіла (матеріалу) враховуються процеси накопичення і розвитку мікрodefektів за допомогою додаткового узагальненого параметра, який в загальному випадку може бути пов'язаний з властивостями матеріалу і/або параметрами відгуку механічної системи в даній точці.

Введемо в розгляд термін пошкоджуваність.

Пошкоджуваністю [7]  $D(x_1, x_2, x_3, t)$  називають безрозмірний параметр, що є мірою накопичених в точці тіла мікрodefektів (пошкоджень), і є функцією координат і часу (тобто полем  $\Omega$ ). Слід зазначити, що процес накопичення мікрodefektів (зростання пошкоджуваності) є необоротним, і як наслідок, параметр пошкоджуваності є функцією, що не змінюється з часом.

Часто для оцінки надійності достатньо обмежитися тільки розглядом рахункового числа точок тіла (де має місце локалізація напружено-деформованого стану (НДС) і розгляд пошкоджуваності проводити не для всього об'єму, а для кінцевого вектора пошкоджуваності.

У анізотропному тілі пошкоджуваність також може бути різною у різних напрямках. В зв'язку з цим як узагальнення вводиться тензор пошкоджуваності  $D_{ij}(x_1, x_2, x_3, t)$ . При цьому навіть в ізо-

тропному тілі пошкоджуваність слід розглядати, як анізотропну, оскільки в процесі накопичення мікродефектів в матеріалі на стадії розвитку мікротріщин є впорядкованим відповідно до орієнтації параметрів НДС в цій точці тіла.

Фізично пошкоджуваність визначається механізмом накопичення мікродефектів (мікроструктури матеріалу і причин розвитку мікродефектів: втома, повзучість, знос і тому подібне) і залежить від параметрів відгуку системи (напруження, деформації, температура і так далі), а також властивостей матеріалу. Слід зазначити, що пошкоджуваність не має інерційності, оскільки пошкоджуваність не може накопичуватися за відсутності напруження в тілі. Тому вона задовольняє диференціальному рівнянню першого порядку за часом

$$\frac{dD}{dt} = F(D(t), y(t), R), \quad (1)$$

де  $y(t)$  - вектор, що характеризує НДС конструкції,  $R$  - вектор параметрів конструкційної міцності. Передбачається, що в початковий момент часу пошкоджуваність в матеріалі відсутня  $D(0) = 0$ . Рівняння (1) носить назву кінетичного рівняння накопичення пошкоджуваності. Конкретний вид функції  $F$  визначається для конкретного типу матеріалу (виходячи з особливостей його мікроструктури) і механізму утворення і розвитку мікродефектів в ньому.

З метою визначення параметрів пошкодження типу «вм'ятина» і аналізу його впливу на можливість появи тріщиноподібного дефекту, в роботі моделювалося миттєве пошкодження котла цистерни. Механічні пошкодження котлів цистерн, як правило, мають місце в процесі незначних зіткнень різних об'єктів залізничного транспорту (рухомий склад), а також в процесі завантаження-розвантаження технологічним транспортом.

Проведені натурні дослідження цистерн, які знаходяться в деповському ремонті на станції «Куп'янськ-вузлова», показали наступні факти:

– По-перше пошкодження типу «вм'ятина» мають порядку 10% від всього парку цистерн, які стоять в ремонті.

– По друге, пошкодження цистерн зосереджені в декількох основних зонах, а саме передня область циліндрової частини котла (зіткнення з технологічним транспортом, зона 1), і крайні час-

тини еліптичних днищ (зіткнення з елементами інших рухомих складів, зона 2)

Найбільш характерні дефекти типу «вм'ятина» приведені на рис. 1.



Рис. 1 – Дефекти котлів цистерн типу «вм'ятина»

На моделі котла цистерни на рис. 2 показані зони, в яких визначені uszkodження типу «вм'ятина».

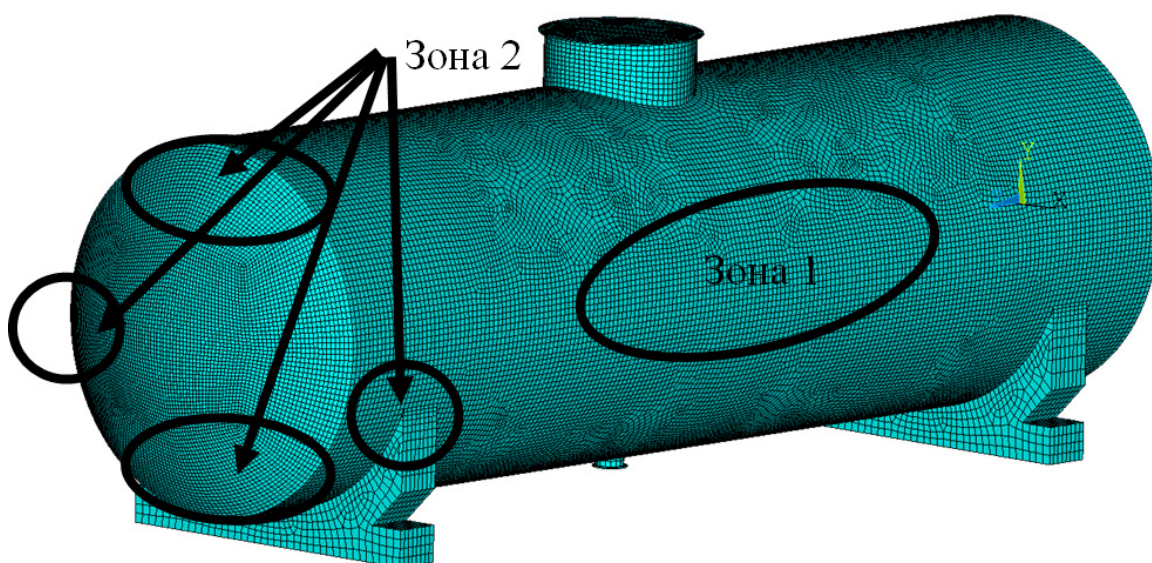


Рис. 2 – Зони на котлі цистерни, де виникають uszkodження

При цьому взаємне співвідношення дефектів в зоні 1 і зоні 2 можна охарактеризувати таким чином. На зону 1 доводиться не більше 2-3 % всіх дефектів, а останні 97-98 % зосереджені в зоні 2. При цьому зону 2 також можна розділити на наступні зони по сту-

пеню зосередження дефектів: бічні частини еліптичного днища цистерни - до 55-60 % пошкоджень, нижня частина еліптичного днища - 35-39 %, останнє - верхня частина днища (до 10 %) пошкоджень.

Моделювання напружено-деформованого стану проводилося для повністю заповненої важким світлим нафтопродуктом котла цистерни. При цьому на котел цистерни накладалися геометричні та силові крайові умови. В якості силових крайових умов прийнято гідростатичний тиск, у якості геометричних – обмеження переміщень по опорах котла цистерни. Також враховувалась можливість виникнення у котлі цистерни внутрішнього надлишкового тиску, який було прийнято рівним 0,04 МПа.

Реальна експлуатація залізничних цистерн пов'язана з випадковими пульсаціями навантажень. Дійсний рух потяга відбувається з деяким довільним розкидом швидкості руху навколо її середнього значення, нерівності шляхів мають випадковий характер через розкид неточностей стиків сусідніх рейок і через невідомість рельєфу, по якому буде направлений потяг. Випадкове навантаження, очевидно, викликає випадкові вібрації цистерн. Останнє приводить до необхідності вирішувати кінетичні рівняння накопичення пошкоджуваності в імовірнісній постановці.

Основні параметри надійності (ресурс, ризик, імовірність відмови) системи визначається по імовірності безвідмовної роботи, а імовірність безвідмовної роботи – це подія що полягає в знаходженні параметра працездатності в рамках області працездатних станів ( $\Omega$ ). З урахуванням введених визначень і позначень [7]

$$R : D(t) \in \Omega \quad (2)$$

$$P(t) = \Pr[R] = \Pr[D(t) \in \Omega] = \int_{\Omega} f_D(D, t) dD \quad (3)$$

або

$$\Omega = [D_0, D_c] \Rightarrow R : D(t) \in [D_0, D_c] \quad (4)$$

$$P(t) = \Pr[D(t) \in [D_0, D_c]] = \int_{D_0}^{D_c} f_D(D, t) dD \quad (5)$$

При умові  $t_{кор} \ll t_{cp}$  виконується центральна гранична теорема теорії імовірності.

Таким чином, пошкоджуваність  $D(t)$  підкоряється нормальному закону Гауса, а розв'язок задачі визначення її імовірнісних характеристик зводиться до обчислення параметрів розподілу.

Математичне очікування може бути обчислене безпосереднім застосуванням оператора усереднювання до виразу [6, 7].

$$m_D = \langle D(t) \rangle = \left\langle \frac{1}{T_\ell \cdot N_0 \cdot \sigma_{-1}^m} \cdot \int_0^t \sigma_a^m(t) \cdot dt \right\rangle = \frac{1}{T_\ell \cdot N_0 \cdot \sigma_{-1}^m} \cdot \int_0^t \langle \sigma_a^m(t) \rangle \cdot dt, \quad (6)$$

де  $\langle \sigma_a^m(t) \rangle$  –  $m$ -й момент амплітуд напружень. З урахуванням того, що випадкові коливання системи розглядаються як стаціонарні,  $m$ -й момент такого випадкового процесу є постійною величиною.

$$m_D = \frac{\langle \sigma_a^m \rangle}{T_e \cdot N_0 \cdot \sigma_{-1}^m} \cdot \int_0^t dt = \frac{\langle \sigma_a^m \rangle}{T_e \cdot N_0 \cdot \sigma_{-1}^m} \cdot t = k_1 \cdot t, \quad (7)$$

$$k_1 = \frac{\langle \sigma_a^m \rangle}{T_e \cdot N_0 \cdot \sigma_{-1}^m}, \quad \langle \sigma_a^m \rangle = \int_0^\infty \sigma_a^m \cdot f(\sigma_a) d\sigma_a, \quad (8)$$

де  $f(\sigma_a)$  – щільність імовірності амплітуд напруження (підкоряється закону Релея згідно [4]).

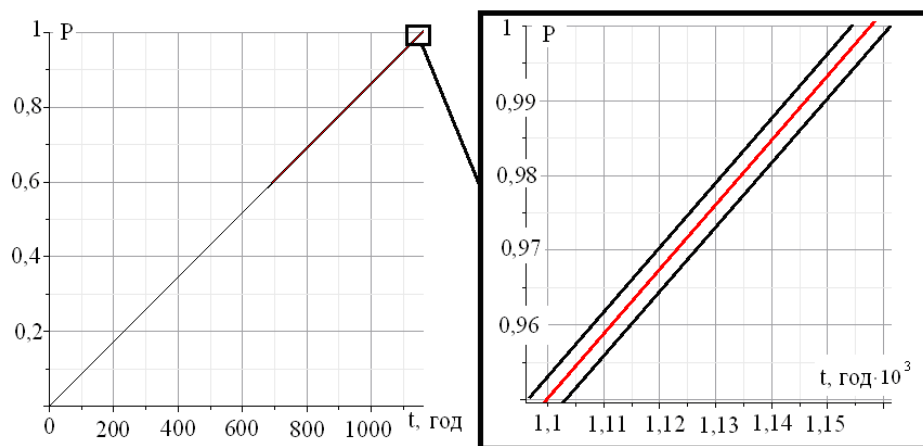
Таким чином, накопичення пошкоджуваності це нестационарний випадковий процес, математичне очікування якого змінюється по лінійному закону [4, 5].

Дисперсія пошкоджуваності як функція часу

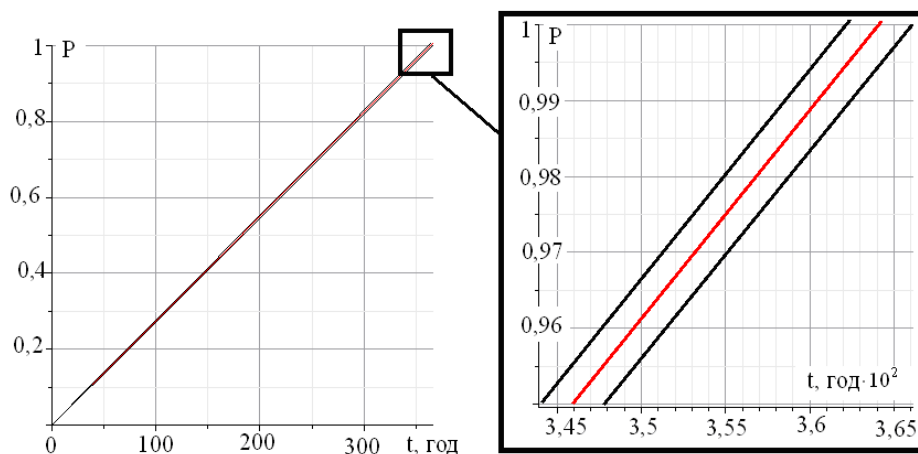
$$\sigma_\psi^2 = (t \cdot k_1^2) / \xi, \quad (9)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт загасання кореляційної функції напруження.

Розглядаючи накопичення пошкоджуваності при експлуатації цистерни з вм'ятинами некритичного розміру (5 см і 12 см) в другій зоні котла, за допомогою запропонованої в [7] методики, отримуємо характерні залежності накопичення пошкоджуваності під час реальної експлуатації (рис. 3).



**Рис. 3а** – Імовірнісні параметри пошкодженості, накопиченої в експлуатованій цистерні з вм'ятиною глибиною 5 см



**Рис. 3б** – Імовірнісні параметри пошкодженості, накопиченої в експлуатованій цистерні з вм'ятиною глибиною 12 см

Певні імовірнісні характеристики нестационарного процесу накопичення пошкоджуваності дозволяють визначити одновимірну щільність імовірності пошкоджуваності, як функцію пошкоджуваності і часу. Дійсно, через центральну граничну теорему імовірності пошкоджуваність підкоряється нормальному закону Гауса, що з урахуванням своїх параметрів, як функцій часу, отримує вигляд

$$f_D(D,t) = \frac{\xi}{\sqrt{2\pi} \cdot k_1 \cdot \sqrt{t}} \cdot \exp\left(-\frac{\xi^2(D - k_1 t)^2}{2 \cdot k_1^2 t}\right) \quad (10)$$

Всі параметри надійності можуть бути легко знайдені через щільність імовірності пошкоджуваності.

Так за класичним визначенням [4] імовірність безвідмовної роботи визначається як

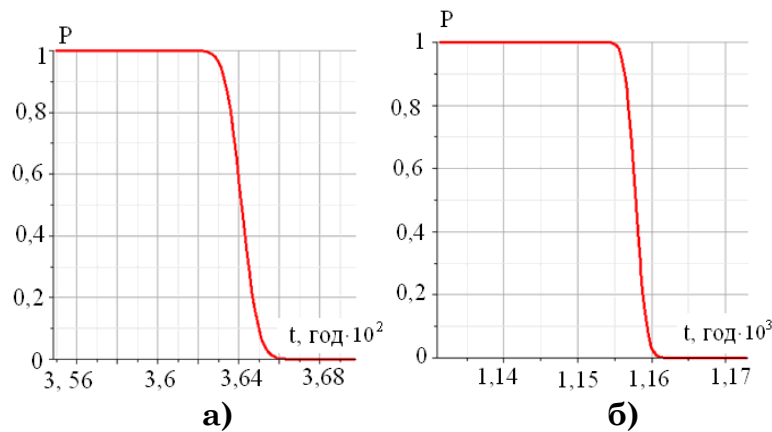
$$P(t) = \Pr[D \in \Omega] = \Pr[0 \leq D \leq 1] = \int_0^1 f_D(D, t) \cdot dD \quad (11)$$

При підстановці в (10) (11) отримуємо відому в математиці узагальнену функцію - функцію помилки. Вона табульована в широкому діапазоні значень, а також має асимптотичне розкладання, що добре сходиться, а це дозволяє для кожного значення часу визначити імовірність безвідмовної роботи.

Через функцію імовірності безвідмовної роботи можна обчислити решту всіх параметрів надійності [7]: термін безпечної експлуатації  $Q$  та щільності вірогідності відмови  $q$

$$Q(t) = 1 - P(t), \quad q(t) = -dP/dt.$$

Результати розрахунків за формулами (10) – (12) приведені на рис. 4-6.



**Рис. 4 – Вірогідність безвідмовної роботи визначена для відмов багатоциклової втоми ( в годинах): а) вм'ятина з глибиною 12 см; б) вм'ятина з глибиною 5 см**



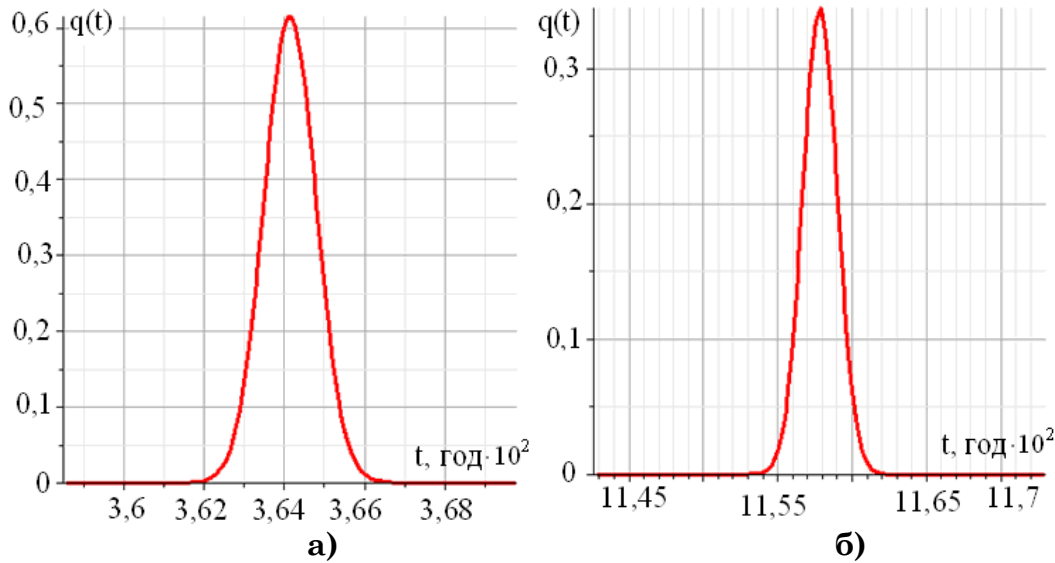


Рис. 5 – Щільність імовірності відмови: а) вм'ятина з глибиною 12 см; б) вм'ятина з глибиною 5 см

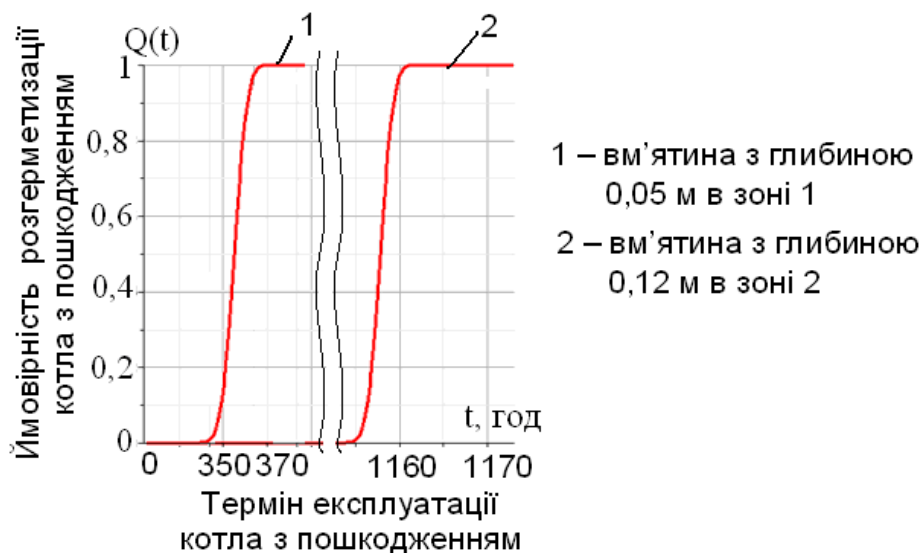


Рис. 6 – Термін безпечної експлуатації цистерни з пошкодженням

**Висновки.** Проведені розрахунки показують, що при наявності пошкодження котла цистерни навіть не критичного розміру накопичення пошкоджень при дії багатоциклової втоми можуть призвести до втрати цілісності котла цистерни, виникнення наскрізних ушкоджень, витікання продукту перевезення з котла, і, як наслідок, до виникнення надзвичайної ситуації.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зеленюк Ю.В., Плахотник В.Н., Ярышкіна Л.А. Ликвідація екологічних наслідків залізничних аварій з нафтопродуктами // Залізничний транспорт України. - Київ, 2005, №2, С. 59-62.
2. Третьяков А. В. Управление индивидуальным ресурсом вагонов. СПб.: ООО «Издательство «ОМ-Пресс», 2004. 348 с.
3. Смольянинов А. В. Анализ конструктивного исполнения котлов цистерн для перевозки опасных грузов за рубежом // РЖ ВИНТИ «Железнодорожный транспорт». – 1989. – №10. – С. 97.
4. Хевиленд Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность.- М.: Мир, 1965.- С. 210.
5. Егоров Е.А. Проблемні аспекти методу граничних станів і можливі шляхи їх вирішення//Металеві конструкції.-Макіївка: ДонДАБтаА, 1999.-Т.2.-№1.-С.23-25
6. Мищенко И.В. Решение задачи надежности объектов повышенной опасности с учетом нестационарности внешнего воздействия. Проблемы надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗУ, 2012. – Вип. 16. – С. 65-69.
7. Жовдак В.А., Тарасова Л.Ф. Прогнозирование надежности механических систем: Учеб.-метод. пособие, Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. 108 с.

Гринченко Е.Н., Гузенко В.А., Елизаров А.В., Приймаков А.Г.

### **Определение срока безопасной эксплуатации котла железнодорожной цистерны с повреждениями типа вмятина**

Рассматривается задача определения показателей надежности котла железнодорожной цистерны с повреждением типа вмятина с учетом нестационарного внешней нагрузки с целью предотвращения аварийных ситуаций на железнодорожном транспорте при перевозке нефтепродуктов

**Ключевые слова:** железная дорога, цистерна, вмятина, аварийная ситуация

Grinchenko Ye.N., Guzenko V.A., Elizarov A.V., Priymakov A.G.

### **Definition of the term safe operation of the boiler railway tank with damage type dent**

The problem of determining the reliability of the boiler tank cars with damage like dents considering unsteady external loading to prevent accidents on the railways for transportation of petroleum products

**Key words:** railway, boiler, dent, accident