

УДК 614.8

Ю.П. Ключка

Національний університет цивільного захисту України, Харків

ОЦІНКА ЙМОВІРНОСТІ РУЙНУВАННЯ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ В РІДКОМУ ВИГЛЯДІ

В результаті проведеної роботи, отримані щільності ймовірності та функції розподілу часу до руйнування системи зберігання водню в рідкому вигляді. Показано, що деформація бака призводить до скорочення часу до руйнування до 10 разів.

Ключові слова: рідкий водень, температура, функція розподілу, щільність ймовірності, час, густина.

Вступ

На сьогоднішній день водень розглядається як один з перспективних екологічно чистих енергоносіїв для транспорту майбутнього [1]. Одним із способів зберігання водню є зберігання в рідкому вигляді (температура 20 К). При цьому, проблемою цих систем є їх пожежовибухонебезпека, обумовлена властивостями водню і самої системи зберігання.

Тому визначення ступеня небезпеки даних систем, що використовуються під впливом зовнішніх чинників, зокрема підвищених температур, є актуальним питанням застосування водню на автомобільному транспорті.

Підвищення температури середовища в автомобілі може бути обумовлено виникненням надзвичайної ситуації, а саме пожежею. В роботах [2 – 3] показано, що динаміка підвищення температури в автомобілі, наприклад, при пожежі, залежить від швидкості розвитку пожежі, місця виникнення, типу автомобіля, наявності додаткових ЛЗР, відкриті або закриті вікна і т.д.

В роботі [4] отримано аналітичні залежності теплових потоків через стінку посудини системи зберігання водню в рідкому вигляді в залежності від зовнішньої температури, яка впливає на стінку бака. Показано, що кількість тепла передається за допомогою теплопровідності істотно нижче, ніж шляхом променистої передачі.

Проте дані моделі не дозволяють оцінити ймовірні характеристики систем зберігання водню, зокрема, ймовірність її руйнування під впливом підвищених температур.

В роботі [4] отримано аналітичні залежності теплових потоків через стінку посудини системи зберігання водню в рідкому вигляді в залежності від зовнішньої температури, яка впливає на стінку бака. Показано, що кількість тепла яка передається за допомогою теплопровідності істотно нижче, ніж шляхом променистої передачі. Проте дані моделі не дозволяють оцінити ймовірні характеристики систем зберігання водню, зокрема, ймовірність її руйнування під впливом підвищених температур.

Основний матеріал

Метою даної роботи є отримання щільності ймовірності руйнування системи зберігання водню (СЗВ) в рідкому вигляді під впливом підвищеної температури навколишнього середовища при різних параметрах СЗВ і водню в ній.

У табл. 1 наведено інтервал зміни параметрів СХВ (табл. 1 [4]).

Відповідно до табл. 1 випадковим чином згенеровано 10^4 можливих варіантів стану системи, в яких розраховано час до руйнування відповідно до роботи [4].

Враховуючи, що вибірка складається з 10000 значень, визначимо кількість діапазонів, на які буде розбитий інтервал $(\tau_{i(\min)}; \tau_{i(\max)})$, виходячи з наступного виразу [5, 6]

$$n = 3,3 \cdot \lg(N) + 1 \approx 15. \quad (1)$$

У табл. 2 наведені значення інтервалів, отримані частоти і інші розрахункові значення для СЗВ в рідкому вигляді ($\xi = 0$).

Аналіз стовпця 5 табл. 2 дозволив припустити, що досліджувана величина розподілена відповідно до гамма розподілу.

Тоді щільність ймовірності часу до руйнування можна представити в наступному вигляді [6]

$$f(\tau) = \frac{\tau^{k-1} \cdot e^{-\frac{\tau}{\theta}}}{\theta^k \cdot \Gamma(k)}, \quad \tau \geq 0, k > 0, \theta \geq 0, \quad (2)$$

де $\Gamma(k)$ – гамма-функція Ейлера, що визначається відповідно до

$$\Gamma(k) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n! n^z}{k(k+1) \dots (k+n)} = \frac{1}{k} \prod_{n=1}^{\infty} \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^k}{1 + \frac{k}{n}}; \quad (3)$$

θ – коефіцієнт масштабу, який визначається у відповідності з виразом

$$\theta = \frac{\sigma^2}{\mu}; \quad (4)$$

Таблиця 1

Значення параметрів

| Параметри | | Максимальне значення | Мінімальне значення |
|--------------------------------------|--------------|----------------------|---------------------|
| Температура навколишнього середовища | T_{os}, K | 1273 | 773 |
| Час досягнення $T_{os(max)}$ | $\tau_n, хв$ | 6 | 1 |
| Маса водню | $m, кг$ | 8 | 5 |
| Ступінь деформації | $\xi, \%$ | 5 | 0 |

Таблиця 2

Розрахункові значення

| 1 | 2 | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|--------------------|---------------|--------------------------------|--------------------|------------|------------|
| | Границі інтервалів | | Відн. часто-ти, P_i^{emp} | $\tau_i \cdot P_i$ | P_i^{th} | χ_i^2 |
| | $\tau_{i(n)}$ | $\tau_{i(k)}$ | | | | |
| 1 | 100,0 | 176,7 | 0,0599 | 2,30 | 0,0564 | 2,161 |
| 2 | 176,7 | 253,3 | 0,1549 | 17,81 | 0,1504 | 1,368 |
| 3 | 253,3 | 330,0 | 0,1754 | 33,62 | 0,1778 | 0,330 |
| 4 | 330,0 | 406,7 | 0,1577 | 42,32 | 0,1634 | 1,968 |
| 5 | 406,7 | 483,3 | 0,1309 | 45,16 | 0,1327 | 0,245 |
| 6 | 483,3 | 560,0 | 0,0987 | 41,62 | 0,1002 | 0,226 |
| 7 | 560,0 | 636,7 | 0,0703 | 35,03 | 0,0721 | 0,445 |
| 8 | 636,7 | 713,3 | 0,0514 | 29,56 | 0,0501 | 0,332 |
| 9 | 713,3 | 790,0 | 0,0367 | 23,92 | 0,0339 | 2,232 |
| 10 | 790,0 | 866,7 | 0,0231 | 16,82 | 0,0225 | 0,138 |
| 11 | 866,7 | 943,3 | 0,0157 | 12,64 | 0,0147 | 0,635 |
| 12 | 943,3 | 1020,0 | 0,0108 | 9,52 | 0,0095 | 1,768 |
| 13 | 1020,0 | 1096,7 | 0,0068 | 6,52 | 0,0061 | 0,892 |
| 14 | 1096,7 | 1173,3 | 0,0046 | 4,76 | 0,0038 | 1,528 |
| 15 | 1173,3 | 1250,0 | 0,0031 | 3,45 | 0,0024 | 2,004 |

k – коефіцієнт, визначається відповідно до

$$k = \frac{\mu}{\theta} \quad (5)$$

При цьому μ – математичне сподівання і σ – дисперсія випадкової величини визначалися відповідно до виразів

$$\mu = \sum_{i=1}^n \tau_i P_i \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n m_i (\tau_i - \mu)^2 \quad (7)$$

Виходячи із значень табл. 2, $k = 2,42$ і $\theta = 134,9$, тоді вираз (2) можна представити у вигляді

$$f_z(\tau) = \frac{5,588 \cdot 10^{-6} \cdot (\tau - 100)^{1,419}}{e^{0,007408(\tau-100)}} \quad (8)$$

Оцінимо узгодженість вибраного теоретичного розподілу з дослідними даними відповідно до критерію Пірсона (критерій χ^2)

$$\chi_p^2 = N \sum_{i=1}^n \frac{(P_i^{th} - P_i^{emp})^2}{P_i^{th}} \quad (9)$$

де P_i^{th} – передбачувана ймовірність попадання в i -й інтервал

$$P_i^{th} = \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} f(\tau) d\tau \quad (10)$$

По таблиці критичних точок χ^2 -розподілу, виходячи з того, що число ступенів свободи $r = 15 - 4 - 1 = 10$, визначимо $\chi_{кр}^2$ ($\chi_{кр}^2 = 18,3$).

З таблиці випливає, що критерій Пірсона $\chi_p^2 = 16,27$. Оскільки $\chi_p^2 < \chi_{кр}^2$, то прийнята гіпотеза про гамма розподілі не суперечить наявним вибірковими даними на рівні значущості 0,05.

На рис. 1 наведені залежності частот, отриманих емпіричним і теоретичним шляхом, і значення χ_i^2 для СЗВ в рідкому вигляді.

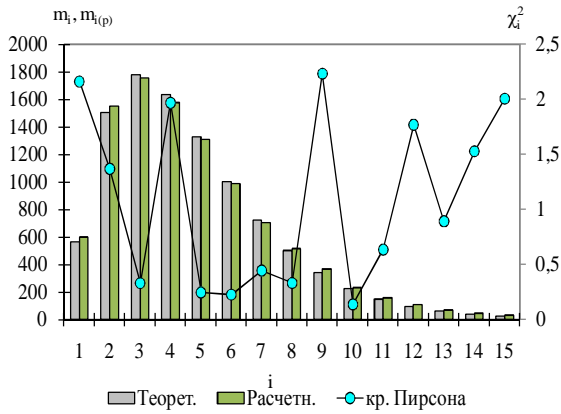


Рис. 1. Залежність частот, отриманих емпіричним і теоретичним шляхом, а також значення χ_i^2 для СЗВ в рідкому вигляді

У табл. 3 наведені значення границь інтервалів, отримані частоти та інші розрахункові значення для СЗВ в рідкому вигляді.

На рис. 2 наведені залежності частот, отриманих емпіричним і теоретичним шляхом, і значення χ_i^2 для СЗВ в рідкому вигляді з урахуванням можливої деформації.

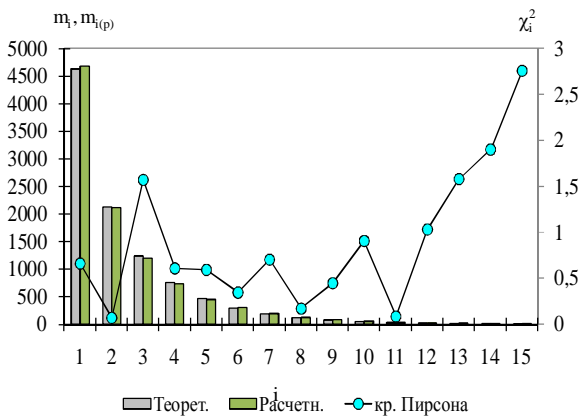


Рис. 2. Залежність частот, отриманих емпіричним і теоретичним шляхом, а також значення χ_i^2 для СЗВ в рідкому вигляді з урахуванням можливої деформації

Аналогічним чином були отримані характеристики для СЗВ водню з урахуванням деформації (рис. 2):

$$k = 0,779, \theta = 11,19,$$

$$\chi_p^2 = 13,4$$

Прийнята гіпотеза про нормальний розподіл на рівні значущості 0,05, підтвердилася.

Щільності ймовірностей часу до руйнування СЗВ в рідкому вигляді з урахуванням можливої деформації можна представити в наступному вигляді:

$$f_{zd}(\tau) = \frac{0,1282 \cdot e^{-0,0893(\tau-1)}}{(\tau-1)^{0,221}}. \quad (11)$$

На рис. 3 і 4, відповідно до (8) і (11), представлені щільності ймовірності та функції розподілу часу до руйнування СЗВ в рідкому вигляді (табл. 1 – табл. 3).

З рис. 4 випливає, що ймовірність руйнування СЗВ в рідкому вигляді з урахуванням деформації після закінчення певного часу істотно вище ніж без деформації. Так, наприклад, імовірність руйнування 0,8 досягається через 22 і 600 хвилин, відповідно.

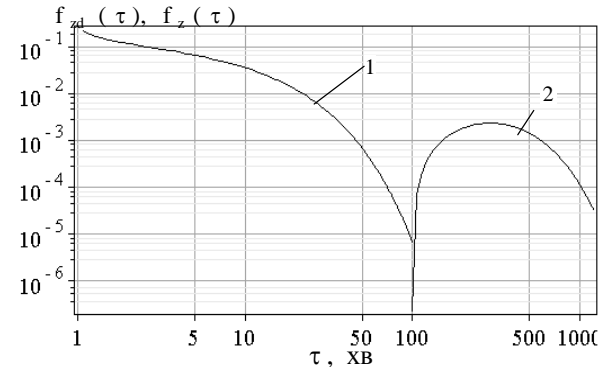


Рис. 3. Щільність ймовірності часу до руйнування баку з воднем:
1 – деформований бак;
2 – недеформований бак

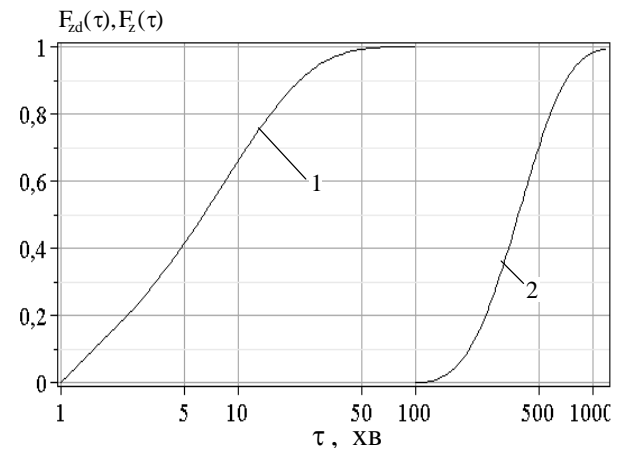


Рис. 4. Функція розподілу часу до руйнування баку з воднем:
1 – деформований бак,
2 – недеформований бак

Висновки

В результаті проведеної роботи, отримані щільності ймовірності та функції розподілу часу до руйнування СЗВ в рідкому вигляді.

Дані результати будуть використані при визначенні більш безпечної СЗВ, в тому числі, СЗВ у формі гідридів інтерметалідів і в газоподібному вигляді.

Таблиця 3

Розрахункові значення

| 1 | 2 | | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|--------------------|---------------|--------------------------------|--------------------|------------|------------|
| | Границі інтервалів | | | | | |
| | $\tau_{i(n)}$ | $\tau_{i(k)}$ | Відн. часто-ти, P_i^{emp} | $\tau_i \cdot P_i$ | P_i^{th} | χ_i^2 |
| 1 | 1,00 | 5,73 | 0,4682 | 1,108 | 0,4682 | 0,659 |
| 2 | 5,73 | 10,47 | 0,2112 | 1,500 | 0,2112 | 0,069 |
| 3 | 10,47 | 15,20 | 0,1192 | 1,411 | 0,1192 | 1,570 |
| 4 | 15,20 | 19,93 | 0,0729 | 1,208 | 0,0729 | 0,606 |
| 5 | 19,93 | 24,67 | 0,0448 | 0,954 | 0,0448 | 0,591 |
| 6 | 24,67 | 29,40 | 0,0301 | 0,784 | 0,0301 | 0,345 |
| 7 | 29,40 | 34,13 | 0,0195 | 0,600 | 0,0195 | 0,702 |
| 8 | 34,13 | 38,87 | 0,0121 | 0,430 | 0,0121 | 0,171 |
| 9 | 38,87 | 43,60 | 0,008 | 0,322 | 0,008 | 0,446 |
| 10 | 43,60 | 48,33 | 0,0054 | 0,243 | 0,0054 | 0,905 |
| 11 | 48,33 | 53,07 | 0,0032 | 0,159 | 0,0032 | 0,084 |
| 12 | 53,07 | 57,80 | 0,0024 | 0,131 | 0,0024 | 1,030 |
| 13 | 57,80 | 62,53 | 0,0017 | 0,101 | 0,0017 | 1,578 |
| 14 | 62,53 | 67,27 | 0,0012 | 0,077 | 0,0012 | 1,899 |
| 15 | 67,27 | 72,00 | 0,0009 | 0,062 | 0,0009 | 2,754 |

Список літератури

1. Ключка Ю.П. Особливості використання водню на автомобільному транспорті / Ю.П. Ключка, В.І. Кривцова, Ю.П. Ключка // Проблеми пожежної безпеки. – 2009. – № 26. – С. 49-61.

2. Пожежна безпека автомобіля [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.jcwiki.ru/> Пожарная безопасность автомобиля.

3. Клаус Д.П. Роль природно-наукової криміналістики / Клаус Дітер Поль. – Москва, 1985. – 311 с.

4. Ключка Ю.П. Визначення параметрів нагрівання рідкого водню в баку автомобіля / Ю.П. Ключка // Науко-

вий вісник будівництва. Збірник наукових праць. – Х.: ХДТУБА, 2012. – Вип. 51. – С. 83-96.

5. Свешиников О.О. Прикладні методи теорії випадкових функцій / О.О. Свешиников – М.: Наука, 1968, – 464 с.

6. Боровков А.А. Теорія ймовірностей / А.А. Боровков. – М.: Наука, 1986. – 432 с.

Надійшла до редколегії 7.02.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.І. Кривцова, Національний університет цивільного захисту України, Харків.

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА В ЖИДКОМ ВИДЕ

Ю.П. Ключка

В результате проведенной работы, получены плотности вероятности и функции распределения времени до разрушения системы хранения водорода в жидком виде. Показано, что деформация бака приводит к сокращению времени до разрушения до 10 раз.

Ключевые слова: Жидкий водород, температура, функция распределения, плотность вероятности, время, плотность.

EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF DAMAGE HYDROGEN STORAGE SYSTEMS IN A LIQUID FORM

Yu.P. Kluchka

As a result of the work, obtained the probability density and distribution function of time before the destruction of the storage of hydrogen in liquid form. It is shown that the deformation of the tank reduces the time to failure of up to 10 times.

Keywords: Liquid hydrogen, the temperature distribution function, probability density, time, density.