

Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПІДСИСТЕМИ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ТА ПОДАЧІ ВОДНЮ

Ефективність функціонування підсистеми пожежної безпеки системи зберігання та подачі водню визначається ймовірністю того, що підсистема правильно розпізнає дійсний стан такої системи. Величина цієї ймовірності визначається коренями системи рівнянь Колмогорова, наведеної в матричній формі розміру 8×7 . Розглянуто типові варіанти функціонування підсистеми пожежної безпеки, для яких наведено вирази, що характеризують її ефективність.

Ключові слова: пожежна безпека, ефективність, система зберігання та подачі водню.

Постановка проблеми

Очікується, що в 21 столітті водень стане одним із найважливіших носіїв енергії. Одним із основних ключів до цього є безпечне, компактне та економічно ефективне зберігання водню, що забезпечується системами зберігання водню (HSS) [1]. Система експлуатації таких систем містить ряд підсистем, однією з яких є підсистема пожежної безпеки, на яку покладається завдання з визначення рівня пожежонебезпеки систем зберігання та подачі водню. Для цього в підсистемі пожежної безпеки передбачається реалізація режимів контролю, тестування та самоконтролю. Однією із проблем при формуванні таких алгоритмів роботи підсистеми зберігання та подачі водню є забезпечення високого ступеня довіри до результатів, які надаються такою підсистемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У [2] відмічається, що існують серйозні проблеми із безпекою, які пов'язані з водневими технологіями. Безпека водневих систем розглядається у двох напрямках: безпека, пов'язана з властивостями водню, і безпека, пов'язана з експлуатацією водневих систем. У концентрованому вигляді властивості водню наведені в [3]. Серед специфічних властивостей водню слід виділити мінімальну енергію запалювання – 0,02 МДж та широкий діапазон займистості (об'ємна частка водню становить $(4,1 \div 74,1) \%$).

У [4] зазначається, що вирішальною при запобіганні пожежам та вибухам у водневих системах є ефективна оцінка ризиків. На прикладі станції заправки воднем показано, що такий ризик становить $5,8 \cdot 10^{-5}$ та $3,4 \cdot 10^{-4}$ на станції та біля неї. У [5] показано, що при великих пошкодженнях бортової водневої системи ймовірність вибуху може досягати 0,87. Ці результати отримані з використанням чисельних моделей,

унаслідок чого одержання кількісної оцінки ризиків (QRA) суттєво залежить від точності таких моделей і потребує відповіді на питання стосовно ефективності методу QRA. Аналогічні результати наведено в [6] для одержання QRA для останньої моделі водневої заправної станції (HRS). Особливістю цих результатів є те, що вони одержані з використанням аналізу режиму та ефекту відмови (FMEA). Достовірність отриманих результатів не оцінюється.

У [7] проаналізовано наслідки розриву резервуара для водню, який знаходиться під тиском 70 МПа. При аналізі використовується рейтинг вогнестійкості (FRR). Такий підхід не дає можливості для оцінки рівня пожежної безпеки водневої системи. У [8] із використанням методів дослідження небезпеки і працездатності (HAZOP) та FMEA проведені дослідження бортової системи зберігання та подачі водню. Ступінь довіри до одержаних результатів не наводиться. В [9] наведені експериментальні дані відносно катастрофічних наслідків розриву резервуарів із воднем. Відмічається, що небезпека вибуху балонів для зберігання водню пов'язана із сукупним внеском фізичної та хімічної енергії вибуху. Варто зазначити, що ці результати можуть бути використані для формування тенденцій із забезпечення безпечної експлуатації транспортних засобів на інтуїтивному рівні. Аналогічні результати описано в [10]. У [9, 10] наводяться дані щодо того, за яких умов можуть виникнути вибухи, але відсутні дані стосовно ризиків їх появи. Одним із шляхів виходу з цієї ситуації є встановлення взаємозв'язку між показниками пожежовибухонебезпеки та показниками надійності. Приклад такого підходу надано в [11], в основі якого лежить використання ймовірності безвідмовної роботи основних елементів системи зберігання та подачі водню, відмова яких обумовлює появу пожежонебезпечної ситуації.

У [12] звертається увага на те, що дані щодо

надійності систем зберігання та подачі водню практично відсутні. Особливо це стосується твердотільних систем зберігання та подачі водню. Для виходу з цієї ситуації можна використовувати нетрадиційні підходи, зокрема показники, одержані за допомогою частотних характеристик газогенератора системи зберігання та подачі водню [13]. Але такий підхід потребує відповіді на питання відносно його ефективності. В [14] показано, що доцільним є забезпечення контролю пожежонебезпечного стану систем зберігання та подачі водню, та визначається ефективність функціонування такої системи. Слід зазначити, що ефективність підсистеми пожежної безпеки системи зберігання та подачі водню, яка оцінюється у цьому разі, не охоплює всі режими її функціонування.

Все це дає підстави для розширених досліджень стосовно ефективності функціонування підсистеми пожежної безпеки системи зберігання та подачі водню.

Мета та завдання статті

Метою дослідження є одержання виразів для ефективності функціонування підсистеми пожежної безпеки системи зберігання та подачі водню для різних режимів її функціонування.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання:

- побудувати математичну модель, яка описує можливі режими функціонування підсистеми пожежної безпеки системи зберігання та подачі водню;
- одержати математичні моделі, які є основою для побудови виразу, що описує ефективність функціонування підсистеми пожежної безпеки системи зберігання та подачі водню;
- одержати загальний вираз для ефективності функціонування підсистеми пожежної безпеки системи зберігання та подачі водню та розглянути його часткові варіанти.

Виклад основного матеріалу

Система зберігання та подачі водню може знаходитися в одному із двох станів: пожежобезпечному – BB або пожежонебезпечному – NN. Унаслідок

контролю або тестування цієї системи підсистемою пожежної безпеки система зберігання та подачі водню може бути визнана такою, що відповідає одному із чотирьох станів:

- BB – пожежобезпечний стан;
- NN – пожежонебезпечний стан;
- NB – пожежобезпечний стан при дійсному стані, який відповідає пожежонебезпечному стану;
- BN – пожежонебезпечний стан при дійсному стані, який відповідає пожежобезпечному стану.

Кожному стану відповідає ймовірність знаходження системи зберігання та подачі водню у цьому стані. Ступінь довіри до одержаних за допомогою підсистеми пожежної безпеки результатів – достовірність її функціонування – може бути визначено умовною ймовірністю $D(t)$, що ця підсистема правильно розпізнає дійсний стан системи зберігання та подачі водню.

Ця умовна ймовірність визначається виразом:

$$D(t) = P_{BB}(t) + P_{NN}(t), \quad (1)$$

де $P_{BB}(t)$, $P_{NN}(t)$ – ймовірність знаходження системи зберігання та подачі водню, відповідно, у стані BB та NN.

Для визначення достовірності $D(t)$ – ефективності функціонування підсистеми пожежної безпеки – представимо модель її функціонування у вигляді графа станів, в яких вона може знаходитись. Граф станів підсистеми пожежної безпеки наведено на рис. 1.

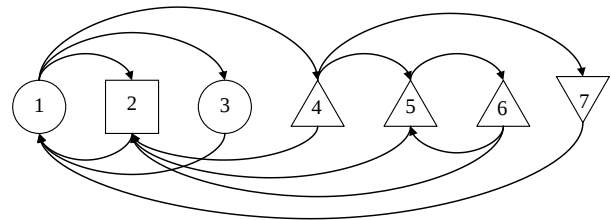


Рис. 1. Граф станів підсистеми пожежної безпеки: 1, 3 – відповідає стану BB; 2 – відповідає стану NN; 4, 5, 6 – відповідає стану NB; 7 – відповідає стану BN

Вагова матриця G для цього графа має вигляд:

$$G = \begin{pmatrix} 0 & \mu_0 & \mu_t & 0 & 0 & 0 & \mu_c \\ \omega_p \lambda_0 & 0 & 0 & \omega_p \lambda_0 & \omega_t \mu_t & \omega_p \lambda_b & 0 \\ \lambda_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1 - \omega_p) \lambda_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_t & 0 & \lambda_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1 - \omega_t) \mu_t & 0 & 0 \\ \lambda_c & 0 & 0 & \lambda_c & 0 & \lambda_c & 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

У цій матриці: ω_p, ω_t – повнота контролю та повнота тестування, відповідно; $\lambda_0, \lambda_t, \lambda_c$ – інтенсивність переходу підсистеми пожежної безпеки від одного стану до іншого при контролі та тестуванні системи зберігання та подачі водню та при самоконтролі підсистеми пожежної безпеки, відповідно; μ_0, μ_t, μ_c – інтенсивність відновлення стану при контролі та тестуванні системи зберігання та подачі водню та при самоконтролі підсистеми пожежної безпеки, відповідно.

Ефективність функціонування підсистеми пожежної безпеки визначається виразом:

$$D = \sum_{i=1}^3 P_i, \quad (3)$$

де P_i – ймовірність знаходження підсистеми пожежної безпеки в i -тому стані.

Ймовірності P_i визначаються коренями рівнянь Колмогорова, які в матричній формі мають вигляд:

$$B \cdot P = A, \quad (4)$$

де

$$P = (P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 P_6 P_7)^T; \quad (5)$$

$$A = (00000001)^T; \quad (6)$$

$$B = \begin{pmatrix} a_{11} & \mu_0 & \mu_t & 0 & 0 & 0 & \mu_c \\ \omega_p \lambda_0 & -\mu_0 & 0 & \omega_p \lambda_0 & \omega_t \mu_t & \omega_p \lambda_0 & 0 \\ \lambda_t & 0 & \mu_t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1-\omega_p) \lambda_0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_t & \mu_t & \lambda_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-\omega_t) \mu_t & a_{66} & 0 \\ \lambda_c & 0 & 0 & \lambda_c & 0 & \lambda_c & -\mu_c \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= -(\lambda_0 + \lambda_t + \lambda_c); \\ a_{44} &= a_{66} = -(\omega_p \lambda_0 + \lambda_t + \lambda_c); \end{aligned} \quad (8)$$

Для коренів $P_i (i = \overline{1,3})$ системи (4) маємо:

$$\begin{aligned} P_1 &= (\omega_p \lambda_0 + \omega_t \lambda_t + \lambda_c) \times \\ &\times F^{-1}(\omega_p, \omega_t, \lambda_0, \lambda_t, \lambda_c, \mu_0, \mu_t, \mu_c); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{\lambda_0}{\mu_0} (\omega_p \lambda_0 + \omega_t \lambda_t + \omega_p \lambda_c) \times \\ &\times F^{-1}(\omega_p, \omega_t, \lambda_0, \lambda_t, \lambda_c, \mu_0, \mu_t, \mu_c); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} P_3 &= \frac{\lambda_t}{\mu_t} (\omega_p \lambda_0 + \omega_t \lambda_t + \lambda_c) \times \\ &\times F^{-1}(\omega_p, \omega_t, \lambda_0, \lambda_t, \lambda_c, \mu_0, \mu_t, \mu_c), \end{aligned} \quad (11)$$

де

$$\begin{aligned} F(\omega_p, \omega_t, \lambda_0, \lambda_t, \lambda_c, \mu_0, \mu_t, \mu_c) &= (\lambda_0 + \lambda_c) \times \\ &\times \left(1 + \omega_p \frac{\lambda_0}{\mu_0} + \frac{\lambda_t}{\mu_t} + \frac{\lambda_c}{\mu_c} \right) + \omega_t \lambda_t \left(1 + \frac{\lambda_0}{\mu_0} + \frac{\lambda_t}{\mu_t} + \frac{\lambda_c}{\mu_c} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Після об'єднання (3) та (9)-(12) вираз для ефективності функціонування підсистеми пожежної безпеки набуває наступного вигляду:

$$\begin{aligned} D &= \left[(\omega_p \lambda_0 + \omega_t \lambda_t) \left(1 + \frac{\lambda_0}{\mu_0} + \frac{\lambda_t}{\mu_t} \right) + \lambda_c \left(1 + \omega_p \frac{\lambda_0}{\mu_0} + \frac{\lambda_t}{\mu_t} \right) \right] \times \\ &\times \left[(\lambda_0 + \lambda_c) \left(1 + \omega_p \frac{\lambda_0}{\mu_0} + \frac{\lambda_t}{\mu_t} + \frac{\lambda_c}{\mu_c} \right) + \right. \\ &\left. + \omega_t \lambda_t \left(1 + \frac{\lambda_0}{\mu_0} + \frac{\lambda_t}{\mu_t} + \frac{\lambda_c}{\mu_c} \right) \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (13)$$

Розглянемо типові варіанти функціонування підсистеми пожежної безпеки.

1. Режим контролю.

У цьому разі ефективність підсистеми пожежної безпеки описується виразом:

$$D_1 = \omega_p \left(1 + \frac{\lambda_0}{\mu_0} \right) \left(1 + \omega_p \frac{\lambda_0}{\mu_0} \right)^{-1}, \quad (14)$$

який співпадає із виразом, наведеним в [14].

$\omega_p = 1,0$ свідчить про абсолютну ефективність підсистеми пожежної безпеки, тобто $D_1 = 1,0$. Якщо $\mu_0 \rightarrow \infty$, що відповідає відновленню попереднього стану за малий інтервал часу, то $D_1 \rightarrow \omega_p$. При $\mu_0 \rightarrow 0$, що відповідає великому часу відновлення, то ефективність підсистеми пожежної безпеки наближається до одиниці. Аналогічним результат буде для високонадійної підсистеми із великим часом відновлення.

2. Режим контролю із самоконтролем.

Для такого режиму ефективність функціонування підсистеми пожежної безпеки описується виразом:

$$\begin{aligned} D_2 &= \left[\omega_p \lambda_0 \left(1 + \frac{\lambda_0}{\mu_0} \right) + \lambda_c \left(1 + \omega_p \frac{\lambda_0}{\mu_0} \right) \right] \times \\ &\times \left[(\lambda_0 + \lambda_c) \left(1 + \omega_p \frac{\lambda_0}{\mu_0} + \frac{\lambda_c}{\mu_c} \right) \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (15)$$

При $\omega_p = 1,0$ ефективність підсистеми пожежної безпеки не є абсолютною, тобто $D_2 < 1,0$. Це обумовлено кінцевими значеннями параметрів λ_c та μ_c , які характеризують рівень безвідмовності елементів самоконтролю та рівень досконалості засобів відновлення, відповідно. Для високонадійних елементів самоконтролю $\lambda_c \rightarrow 0$ вираз співпадає із виразом (14). Із порівняння цих виразів випливає, що введення режиму самоконтролю знижує ефективність функціонування підсистеми пожежної безпеки.

3. Режим контролю і тестування.

Ефективність підсистеми пожежної безпеки у цьому разі визначається виразом:

$$D_3 = \left[(\omega_p \lambda_0 + \omega_t \lambda_t) \left(1 + \frac{\lambda_0}{\mu_0} + \frac{\lambda_t}{\mu_t} \right) \right] \times \left[\lambda_0 \left(1 + \omega_p \frac{\lambda_0}{\mu_0} + \frac{\lambda_t}{\mu_t} \right) + \omega_t \lambda_t \left(1 + \frac{\lambda_0}{\mu_0} + \frac{\lambda_t}{\mu_t} \right) \right]^{-1} \quad (16)$$

При $\omega_p = \omega_t = 1,0$ ефективність підсистеми пожежної безпеки є абсолютною, тобто $D_3 = 1,0$. Якщо елементи тестування є високонадійними ($\lambda_t \rightarrow 0$), то вираз (16) співпадає із виразом (14). При $\lambda_t \neq 0$ і при великому часі відновлення (за результатами тестування), тобто при $\mu_t \rightarrow 0$ ефективність D_3 практично не відрізняється від величини ω_p .

Величини параметрів μ_0 , μ_t та μ_c на відміну від величин параметрів λ_0 , λ_t та λ_c можуть варіюватися. Для вибору величин параметрів μ_0 , μ_t або μ_c може бути використана умова:

$$P_2 \leq P_{2d}, \quad (17)$$

де P_{2d} – допустиме значення ймовірності знаходження підсистеми пожежної безпеки в стані NN.

Наприклад, якщо брати до уваги, що

$$\mu_0 = \tau_0^{-1}, \quad (18)$$

де τ_0 – час відновлення, то із (10), (17) та (18) випливає вираз для параметрів τ_0 :

$$\tau_0 \leq P_{2d} (\lambda_0 + \omega_t \lambda_t + \lambda_c) \left(1 + \frac{\lambda_t}{\mu_t} + \frac{\lambda_c}{\mu_c} \right) \times \left[\lambda_0 [\omega_p (\lambda_0 + \lambda_c) + \omega_t \lambda_t] \right]^{-1}, \quad (19)$$

де враховано, що $1 - P_{2d} \approx 1,0$.

При $\lambda_t = \lambda_c \rightarrow 0$ цей вираз трансформується до вигляду:

$$\tau_0 \leq P_{2d} (\omega_p \lambda_0)^{-1}, \quad (20)$$

що співпадає із результатами, які наведені в [14].

Висновки

1. Із використанням теорії графів побудовано математичну модель, яка описує функціонування підсистеми пожежної безпеки системи зберігання та подачі водню в режимах контролю, тестування та самоконтролю. Для графа станів підсистеми пожежної безпеки наведено вагову матрицю розміром 7×7 , елементами якої є інтенсивності переходу такої підсистеми від одного стану до іншого, інтенсивності відновлення станів та повнота контролю і тестування.

2. Одержано математичні моделі, які є основою для побудови загального виразу, що описує ефективність функціонування підсистеми пожежної безпеки системи зберігання та подачі водню. Як такі математичні моделі використовуються ймовірності знаходження підсистеми у відповідному стані. Для визначення цих ймовірностей одержано рівняння Колмогорова, надані в матричній формі, основна матриця якої має розмір 8×7 .

3. Одержано загальний вираз для ефективності функціонування підсистеми пожежної безпеки системи зберігання та подачі водню, адитивними складовими якого є ймовірності знаходження цієї підсистеми в станах, що відповідають пожежобезпечному та пожежонебезпечному станам системи зберігання та подачі водню. Розглянуто часткові випадки, які характеризують ефективність підсистеми пожежної безпеки системи зберігання та подачі водню при контролі, тестуванні та при самоконтролі. Для цих випадків наведено вирази, які характеризують ефективність підсистеми пожежної безпеки системи зберігання та подачі водню у відповідному режимі її функціонування.

Література

1. Abe, J. O., Popoola, A. P. I., Ajenifuja, E., & Popoola, O. M. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (29), 15072-15086. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
2. Abohamzeh, E., Salehi, F., Sheikholeslami, M., Abbassi, R., & Khan, F. (2021). Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 72, 104569. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104569>
3. Yang, F., Wang, T., Deng, X., Dang, J., Huang, Z., Hu, S., Li, Y., & Ouyang, M. (2021). Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (61), 31467-31488. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.005>

4. Yu, X., Kong, D., He, X., & Ping, P. (2023). Risk Analysis of Fire and Explosion of Hydrogen-Gasoline Hybrid Refueling Station Based on Accident Risk Assessment Method for Industrial System Fire, 6 (5), 181. Doi: <https://doi.org/10.3390/fire6050181>
5. Ma, Q., He, Y., You, J., Chen, J., & Zhang, Z. (2024). Probabilistic risk assessment of fire and explosion of onboard high-pressure hydrogen system International Journal of Hydrogen Energy, 50, 1261-1273. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.157>
6. Cui, S., Zhu, G., He, L., Wang, X., & Zhang, X. (2023). Analysis of the fire hazard and leakage explosion simulation of hydrogen fuel cell vehicles Thermal Science and Engineering Progress, 41, 101754. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101754>
7. Kashkarov, S., Dadashzadeh, M., Sivaraman, S., & Molkov, V. (2022). Quantitative Risk Assessment Methodology for Hydrogen Tank Rupture in a Tunnel Fire Hydrogen, 3 (4), 512-530. Doi: <https://doi.org/10.3390/hydrogen3040033>
8. Shen, Y., Lv, H., Hu, Y., Li, J., Lan, H., & Zhang, C. (2023). Preliminary hazard identification for qualitative risk assessment on onboard hydrogen storage and supply systems of hydrogen fuel cell vehicles Renewable Energy, 212, 834-854. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.037>
9. Cui, S., Zhu, G., He, L., Wang, X., & Zhang, X. (2023). Analysis of the fire hazard and leakage explosion simulation of hydrogen fuel cell vehicles Thermal Science and Engineering Progress, 41, 101754. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101754>
10. Li, B., Han, B., Li, Q., Gao, W., Guo, C., Lv, H., Liu, Y., Jin, X., & Bi, M. (2022). Study on hazards from high-pressure on-board type III hydrogen tank in fire scenario: Consequences and response behaviours International Journal of Hydrogen Energy, 47 (4), 2759-2770. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.205>
11. Abramov, Y., Basmanov, O., Krivtsova, V., Mikhayluk, A., & Khmyrov, I. (2023). Determining the possibility of the appearance of a combustible medium in the hydrogen storage and supply system Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (4 (122)), 47-54. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276099>
12. Correa-Jullian, C., & Groth, K. M. (2022). Data requirements for improving the Quantitative Risk Assessment of liquid hydrogen storage systems International Journal of Hydrogen Energy, 47 (6), 4222-4235. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.266>
13. Абрамов Ю.О. Визначення надійності газогенератора системи зберігання та подачі водню/ Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк // Комунальне господарство міст – X, Том 3, вип. 177, 2023, С. 142-146, DOI 10.33042/2522-1809-2023-3-177-142-146.
14. Абрамов Ю.О. ОБГРУНТУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОЖЕЖНО-БЕЗПЕЧНИМ СТАНОМ СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ТА ПОДАЧІ ВОДНЮ Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк Комунальне господарство міст – X, Том 1, вип.175, 2023, С. 125-130. Doi: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-125-130>

References

1. Abe, J. O., Popoola, A. P. I., Ajenifuja, E., & Popoola, O. M. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation International Journal of Hydrogen Energy, 44 (29), 15072-15086. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
2. Abohamzeh, E., Salehi, F., Sheikholeslami, M., Abbassi, R., & Khan, F. (2021). Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 72, 104569. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104569>

3. Yang, F., Wang, T., Deng, X., Dang, J., Huang, Z., Hu, S., Li, Y., & Ouyang, M. (2021). Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process International Journal of Hydrogen Energy, 46 (61), 31467-31488. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.005>
4. Yu, X., Kong, D., He, X., & Ping, P. (2023). Risk Analysis of Fire and Explosion of Hydrogen-Gasoline Hybrid Refueling Station Based on Accident Risk Assessment Method for Industrial System Fire, 6 (5), 181. Doi: <https://doi.org/10.3390/fire6050181>
5. Ma, Q., He, Y., You, J., Chen, J., & Zhang, Z. (2024). Probabilistic risk assessment of fire and explosion of onboard high-pressure hydrogen system International Journal of Hydrogen Energy, 50, 1261-1273. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.157>
6. Cui, S., Zhu, G., He, L., Wang, X., & Zhang, X. (2023). Analysis of the fire hazard and leakage explosion simulation of hydrogen fuel cell vehicles Thermal Science and Engineering Progress, 41, 101754. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101754>
7. Kashkarov, S., Dadashzadeh, M., Sivaraman, S., & Molkov, V. (2022). Quantitative Risk Assessment Methodology for Hydrogen Tank Rupture in a Tunnel Fire Hydrogen, 3 (4), 512-530. Doi: <https://doi.org/10.3390/hydrogen3040033>
8. Shen, Y., Lv, H., Hu, Y., Li, J., Lan, H., & Zhang, C. (2023). Preliminary hazard identification for qualitative risk assessment on onboard hydrogen storage and supply systems of hydrogen fuel cell vehicles Renewable Energy, 212, 834-854. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.037>
9. Cui, S., Zhu, G., He, L., Wang, X., & Zhang, X. (2023). Analysis of the fire hazard and leakage explosion simulation of hydrogen fuel cell vehicles Thermal Science and Engineering Progress, 41, 101754. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101754>
10. Li, B., Han, B., Li, Q., Gao, W., Guo, C., Lv, H., Liu, Y., Jin, X., & Bi, M. (2022). Study on hazards from high-pressure on-board type III hydrogen tank in fire scenario: Consequences and response behaviours International Journal of Hydrogen Energy, 47 (4), 2759-2770. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.205>
11. Abramov, Y., Basmanov, O., Krivtsova, V., Mikhayluk, A., & Khmyrov, I. (2023). Determining the possibility of the appearance of a combustible medium in the hydrogen storage and supply system Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (4 (122)), 47-54. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276099>
12. Correa-Jullian, C., & Groth, K. M. (2022). Data requirements for improving the Quantitative Risk Assessment of liquid hydrogen storage systems International Journal of Hydrogen Energy, 47 (6), 4222-4235. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.266>
13. Abramov, Y., Kryvtsova, V., & Mikhailyuk, A. (2023). Determination of the reliability of the gas generator of the storage system and hydrogen supply Municipal economy of cities, 3 (177), 142-146. Doi: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-3-177-142-146>
14. Abramov, Y., Kryvtsova, V., & Mikhailyuk, A. (2023). Justification of the characteristics of the fire-safe condition control system of the storage system and hydrogen supply Municipal economy of cities, 1 (175), 125-130. Doi: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-125-130>

Рецензент: д-р техн. наук, проф., головний науковий співробітник наукового відділу з проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки науково-дослідного центру О.С. Басманов, Національний університет цивільного захисту України, Україна.

Автор: АБРАМОВ Юрій Олексійович
доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник науково-дослідного центру
Національний університет цивільного захисту України
E-mail – abramov121146@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7901-3768>

Автор: КРИВЦОВА Валентина Іванівна
доктор технічних наук, професор, професор кафедри фізико-математичних дисциплін факультету техногенно-екологічної безпеки
Національний університет цивільного захисту України
E-mail – krivtsovav53@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8254-5594>

Автор: МИХАЙЛЮК Андрій Олександрович
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник докторантури, ад'юнктури
Національний університет цивільного захисту України
E-mail – mihayluk.nuczu@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4116-164X>

EFFICIENCY OF OPERATION OF THE FIRE SAFETY SUBSYSTEM OF THE HYDROGEN STORAGE AND SUPPLY SYSTEM

Yu. Abramov, V. Kryvtsova, A. Mykhailiuk

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

Hydrogen may become one of the most valuable energy carriers in the 21st century. A big step to this is the safe, compact, and cost-effective storage of hydrogen provided by hydrogen storage systems (HSS). One of the operating system elements of the hydrogen storage and supply system is its fire safety subsystem. The effectiveness of such a subsystem's functioning depends on a conditional probability that this subsystem correctly recognises the actual state of the hydrogen storage and supply system. We carry out the formalisation of the operation of the fire safety subsystem of the hydrogen storage and supply system in the form of a graph of its states. The study considers three modes of operation of such a subsystem: control, testing, and self-control. We build a weight matrix of the fire safety subsystem states. Its elements include the intensity of transitions from one state to another, the recovery intensity, and the completeness of control and testing. The study shows that the roots of the system of Kolmogorov equations determine the efficiency of the functioning of the fire safety subsystem of the hydrogen storage and supply system. We represent this system of equations in matrix form, with the main matrix having a size of 8×7 . Next, we obtain expressions for the roots of such a system of comparisons and construct an expression for the efficiency of the fire safety subsystem's functioning of the hydrogen storage and supply system. This expression applies to all three modes of operation of such a fire safety subsystem. The considered typical modes of operation of the fire safety subsystem of the hydrogen storage and supply system are control mode, control mode with self-control, and control and testing mode. For each of these modes, we obtain expressions that describe their effectiveness. It is necessary to note that the magnitudes of recovery intensities, in contrast to transition intensities, can vary. We further provide an example of choosing the intensities of restoration of the subsystem during its control using the acceptance criterion for the probability of finding the subsystem in a state corresponding to the fire-hazardous state of the hydrogen storage and supply system.

Keywords: fire safety, efficiency, hydrogen storage and supply system.