

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

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕКИ ГАЗОГЕНЕРАТОРА СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ТА ПОДАЧІ ВОДНЮ

В роботі одержано залежність тиску в порожнині газогенератора системи зберігання та подачі водню в залежності від його напрацювання. Показано, що напрацювання газогенератора системи зберігання та подачі водню та випадковий момент часу, в який визначається це напрацювання, є сукупністю випадкових величин. Для напрацювання газогенератора системи зберігання та подачі водню одержані вирази, які описують математичне очікування та дисперсію. Ці вирази, а також вираз для швидкості зміни тиску в порожнині газогенератора системи зберігання та подачі водню із використанням функцій нормального розподілу забезпечують визначення рівня пожежонебезпеки такого газогенератора.

Ключові слова: газогенератор, рівень пожежонебезпеки, ймовірність перевищення величини тиску допустимого значення.

Постановка проблеми

Паливно-енергетичні та екологічні проблеми є найбільш актуальними і глобальними. Вони обумовлені нестачею та подорожчанням енергетичних ресурсів, зростаюча потреба в яких в основному задовольняється за рахунок копалинних палив. Одним із шляхів, здатних змінити цю ситуацію, є використання водневих технологій [1]. Ефективність використання водню визначається, окрім іншого, технічним рівнем систем зберігання та подачі водню [2]. Зокрема, це стосується такої характеристики, як рівень пожежовибухонебезпеки водневих систем. У зв'язку із цим однією із проблем на всіх етапах існування систем зберігання та подачі водню є забезпечення необхідного рівня організаційно-технічних заходів як основних елементів їх пожежної профілактики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним із елементів системи пожежної профілактики систем зберігання та подачі водню є одержання оцінок рівня їх пожежонебезпеки. Всі методи, що використовуються для одержання таких оцінок, можна розділити на дві групи. До першої групи відносяться методи, які ґрунтуються на індексації пожежонебезпеки систем зберігання та подачі водню [3, 4]. Такий підхід дозволяє одержувати оцінки умовного рівня пожежонебезпеки, що доцільно використовувати при ранжуванні систем зберігання та подачі водню. Друга група поєднує стохастичні методи, що орієнтовані на одержання оцінок ймовірності виникнення пожежонебезпечної ситуації в таких системах [5, 6]. В роботі [7] представлений алгоритм

одержання оцінки рівня пожежонебезпеки систем зберігання та подачі водню, в основі якого лежить використання такого показника, як ймовірність відмови системи за умови унеможливлення виникнення в ній пожежі. Такий підхід орієнтований на те, що в системі мають місце раптові відмови. При поступових відмовах в системі зберігання та подачі водню може використовуватися узагальнений параметр, наприклад, постійна часу газогенератора [8]. Величина такого параметра визначається за результатами контролю і використовується для одержання оцінки рівня пожежонебезпеки. Але такий підхід орієнтований на одержання стохастичних оцінок на етапі експлуатації систем зберігання та подачі водню.

У зв'язку із цим актуальною проблемою є розробка методів одержання оцінок рівня пожежної небезпеки систем зберігання та подачі водню на етапі їх проектування.

Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розробка методу одержання оцінки рівня пожежонебезпеки основного елемента системи зберігання та подачі водню – газогенератора на етапі проектування такої системи.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- одержати залежність тиску в порожнині газогенератора системи зберігання та подачі водню від його напрацювання;

- одержати вираз для оцінки рівня пожежонебезпеки газогенератора системи зберігання та подачі водню.

Виклад основного матеріалу

В роботі [9] показано, що при перевищенні величин тиску або температури в порожнині газогенератора системи зберігання та подачі водню вище критичних значень суттєво зростає ризик виникнення пожежонебезпечної ситуації. У зв'язку із цим залежність тиску в порожнині газогенератора $p(t)$ від часу t може бути використана для одержання оцінки рівня його пожежонебезпеки. Слід зазначити, що закон зміни тиску в порожнині газогенератора системи зберігання та подачі водню визначається його напрацюванням – часом подачі водню до споживача $\tau_b(t)$, який є випадковою функцією. Тобто, має місце $p_b(t) = p[\tau_b(t)]$.

Рівень пожежонебезпеки газогенератора системи зберігання та подачі водню у цьому випадку буде визначатись через ймовірність $Q(t)$ того, що в момент часу t величина тиску в порожнині газогенератора $p_b(t) = p[\tau_b(t)]$ буде перевищувати допустиме значення p_d .

При витіканні із порожнини газогенератора водню, маса якого $\Delta m(\tau, t)$, тиск змінюється згідно із виразом [10]

$$p(\tau, t) = \frac{\Delta m(\tau, t)}{V} RT(\tau, t), \quad (1)$$

де V – об'єм порожнини газогенератора; R – газова постійна; T – температура в порожнині газогенератора.

Для функції $\Delta m(\tau, t)$ має місце

$$\Delta m(\tau, t) = \frac{p_0 V}{RT_0} - G(\tau, t)\tau(t), \quad (2)$$

де p_0, T_0 – початкові значення тиску та температури в порожнині газогенератора; $G(\tau, t)$ – витрати водню.

Витрати водню через отвір, площа якого в критичному перерізі S_k , визначається виразом

$$G(\tau, t) = \rho_k U_k S_k \quad (3)$$

де U_k, S_k – швидкість та площа в критичному перерізі відповідно, для яких мають місце співвідношення [10, 11]

$$\rho_k = \frac{p_k}{RT_k}; U_k = (KRT_k)^{0,5};$$

$$p_k = p_1 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}; T_k = T_1 \frac{2}{k+1} \quad (4)$$

У виразі (4) p_k, T_k – тиск та температура в критичному перерізі; k – показник адиабати; p_1, T_1 – тиск та температура на виході редуктора.

В подальшому будемо вважати, що величини температур на вході $T(\tau, t)$ та на виході $T_1(\tau, t)$ редуктора не відрізняються між собою, а процес витікання водню є адиабатичним, тобто [12]

$$T_1(\tau, t) = T(\tau, t) = T_0 \left(\frac{p(\tau, t)}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (5)$$

Об'єднання (2) ÷ (5) трансформує вираз (1) наступним чином

$$p(\tau, t) = p(\tau, t)^{\frac{k-1}{k}} \left[p_0^{\frac{1}{k}} - \frac{p_0 S_k}{V} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \times \left(\frac{2k}{k+1} \right)^{0,5} (p(\tau, t) p_0)^{\frac{1-k}{2k}} \tau(t) \right], \quad (6)$$

який можна записати у вигляді

$$p(\tau, t)^{\frac{k+1}{2k}} = p(\tau, t)^{\frac{k-1}{2k}} p_0^{\frac{1}{k}} - \frac{p_1 S_k}{V} p_0^{\frac{1-k}{2k}} \times \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \left(\frac{2k}{k+1} RT_0 \right)^{0,5} \tau(t). \quad (7)$$

Якщо протягом часу τ тиск в порожнині газогенератора змінюється на величину $\Delta p(\tau, t)$, тобто

$$p(\tau, t) = p_0 \left(1 - \frac{\Delta p(\tau, t)}{p_0} \right), \quad (8)$$

то вираз (7) буде приймати вигляд

$$p_0^{\frac{k+1}{2k}} \left(1 - \frac{\Delta p(\tau, t)}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{2k}} = p_0^{\frac{k+1}{2k}} \left(1 - \frac{\Delta p(\tau, t)}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} - \frac{p_1 S_k}{V} p_0^{\frac{1-k}{2k}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \left(\frac{2k}{k+1} RT_0 \right)^{0,5} \tau(t), \quad (9)$$

При роботі газогенератора має місце

$$\Delta p(\tau, t) p_0^{-1} \ll 1,0, \quad (10)$$

внаслідок чого із врахуванням співвідношень [13]

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{\Delta p(\tau, t)}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{2k}} &= 1 - (k+1) \times \\ &\times \Delta p(\tau, t) (2kp_0)^{-1} + \\ &+ 0,5(1 - k^2) \Delta p^2(\tau, t) (2kp_0)^{-2}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{\Delta p(\tau, t)}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{2k}} &= 1 - (k-1) \times \\ &\times \Delta p(\tau, t) (2kp_0)^{-1} + \\ &+ 0,5(1 - k^2) \Delta p^2(\tau, t) (2kp_0)^{-2}; \end{aligned} \quad (12)$$

вираз (9) приймає наступний вигляд

$$\begin{aligned} \Delta p(\tau, t) &= \frac{kp_1 S_k}{V} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \times \\ &\times \left(\frac{2k}{k+1} RT_0\right)^{0,5} \tau(t). \end{aligned} \quad (13)$$

Для водню $k = 1,41$ [11], тобто

$$k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \left(\frac{2k}{k+1}\right)^{0,5} \approx 1,0, \quad (14)$$

що із врахуванням (13) трансформує вираз (8) у вигляді

$$p(\tau, t) = p_0 - p_1 S_k V^{-1} (RT_0)^{0,5} \tau(t). \quad (15)$$

У загальному випадку напрацювання τ_B газогенератора на момент часу t_B є сукупністю випадкових величин α_{Bi}, β_{Bi}

$$\tau_B = \sum_{i=1}^n \alpha_{Bi}; \quad t_B = \sum_{i=1}^n \beta_{Bi}, \quad (16)$$

де α_{Bi} – тривалість i -того напрацювання; β_{Bi} – інтервал часу між $(i-1)$ – м та i – м моментами часу, внаслідок чого напрацювання $\tau_B(t)$ газогенератора представляє собою систему випадкових величин τ_B та t_B із математичним очікуванням $m[\tau_B(t)]$ та дисперсією $\sigma^2[\tau_B(t)]$

$$m[\tau_B(t)] = \frac{m_\tau}{m_t} t; \quad (17)$$

$$\sigma^2[\tau_B(t)] = \left(\frac{m_\tau}{m_t}\right)^2 \left(\frac{\sigma_\tau^2}{m_\tau^2} + \frac{\sigma_t^2}{m_t^2}\right) t^2, \quad (18)$$

де m_τ, m_t – математичне очікування випадкових величин τ_B та t_B ; $\sigma_\tau^2, \sigma_t^2$ – дисперсія випадкових величин τ_B та t_B .

Внаслідок випадковості функції $\tau_B(t)$ тиск в порожнині газогенератора $p_B(t)$ буде випадковою функцією, математичне очікування $m[p_B(t)]$ та дисперсія $\sigma^2[\tau_B(t)]$ якої мають вигляд

$$m[p_B(t)] = p_0 - a m[\tau_B(t)]; \quad (19)$$

$$\sigma^2[p_B(t)] = a^2 \sigma^2[\tau_B(t)], \quad (20)$$

де параметр a згідно (15) визначається виразом

$$a = p_1 S_k V^{-1} (RT_0)^{0,5}. \quad (21)$$

Якщо $p_d = p_0 + \Delta p_0$, то рівень пожежонебезпеки буде визначатись виразом [14]

$$\begin{aligned} Q(t) &= \Phi \left[\frac{p_0 - a m[\tau_B(t)] - p_0 - \Delta p_0}{a \sigma[\tau_B(t)]} \right] = \\ &= \Phi \left[- \frac{a m[\tau_B(t)] + \Delta p_0}{a \sigma[\tau_B(t)]} \right] = \\ &= 1 - \Phi \left[\frac{a m[\tau_B(t)] + \Delta p_0}{a \sigma[\tau_B(t)]} \right], \end{aligned} \quad (22)$$

де $\Phi[\bullet]$ – функція нормального розподілу.

Визначення рівня пожежонебезпеки газогенератора системи зберігання та подачі водню зводиться до виконання наступної послідовності процедур:

- визначають математичні очікування m_τ , m_t та дисперсії σ_τ^2 , σ_t^2 випадкових величин τ_B та t_B ;

- для заданого моменту часу t згідно виразів (17) та (18) визначають математичне очікування $m[\tau_B(t)]$ та дисперсію $\sigma^2[\tau_B(t)]$ випадкової функції $\tau_B(t)$;

- згідно виразу (21) по заданим параметрам газогенератора та процесу генерації водню визначають параметр a – швидкість зміни тиску в порожнині газогенератора;

- із використанням виразу (22) визначають рівень пожежонебезпеки газогенератора.

Приклад. Газогенератор системи зберігання та подачі водню має параметри:

$T_0 = 300$ К; $p_1 = 10^5$ Па; $S_k V^{-1} = 10^{-4}$ м⁻¹, а його робота характеризується параметрами

$m_\tau = 50$ с; $m_t = 10^4$ с; $\sigma_\tau = 10$ с; $\sigma_t = 10^2$ с; $\Delta p_0 = 10^6$ Па; $a = 1,1 \cdot 10^3$ Па·с⁻¹.

Для таких параметрів на момент часу $t = 10^6$ с

$$m[\tau_B(t)] = 5 \cdot 10^3 \text{ с}; \sigma[\tau_B(t)] = 1,4 \cdot 10^3 \text{ с}.$$

Згідно виразу (22) рівень пожежонебезпеки газогенератора складає $2 \cdot 10^{-4}$.

Висновки

Наголошено, що для визначення рівня пожежонебезпеки основного елемента системи зберігання та подачі водню – газогенератора, використовуються методи, в основі яких лежить індексація пожежонебезпеки та методи, які орієнтовані на одержання оцінок ймовірності виникнення пожежонебезпечних ситуацій.

Показано, що для оцінки рівня пожежонебезпеки газогенератора системи зберігання та подачі водню може використовуватися такий показник, як ймовірність перевищення величини тиску в його порожнині допустимого значення.

Одержана залежність тиску в порожнині газогенератора системи зберігання та подачі водню, яка представляє лінійну функцію від його напрацювання у випадковий момент часу. Ця залежність використовується для визначення математичного очікування та дисперсії тиску в порожнині газогенератора, які, у свою чергу, використовуються через функцію нормального розподілу для побудови методу визначення рівня пожежонебезпеки такого газогенератора.

Література

1. Кривцова В.И. Неисчерпаемая энергия. Книга 4. Ветроводородная энергетика / В.И. Кривцова, А.М. Олейников, А.П. Яковлев.- Харьков: Нац. аэрокосмический университет «ХАИ», 2007.- 606 с.

2. Sorensen B. Renewables and hydrogen energy technologies for sustainable development // *Int. J. Energy Res.* 2008.32. Issue 5: 367-368.

3. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ / В.Т. Монахов.-М.: Химия, 1979. - 424 с.

4. Бесчастнов М.В. Взрывобезопасность и противоаварийная защита химико-технологических процессов / М.В. Бесчастнов. – М.: Химия, 1983. – 472 с.

5. Иванов Б.А. Априорная оценка вероятности воспламенения систем материал-кислород / Б.А. Иванов, С.Е. Наркунский, В.Ф. Пешаков // *Химическая промышленность*. – 1977. - №2. – с.63-67.

6. Борисов В.С. Вероятностная оценка пожароопасности электрической цепи / В.С. Борисов, Ю.К. Писков, В.Г. Попов // *Сб. тр-в ВУНПО*. – 1980. – Вып. 16. – С.34-42.

7. Абрамов Ю.О. Системы хранения и подачи водорода на твердых телах для бортовых энергетических установок / Ю.О. Абрамов, В.И. Кривцова, В.В. Соловей - Х.: 2002. - 277 с. - ISBN – 966-03-1094-3.

8. Dmitriev AL, Ikonnikov VK Hydrogen fueling station using hydrogen generation by aluminum powder hydrothermal oxidations // *Int. Scientific J. for Alternative Energy and Ecology*. 2017. Inssue 10: 75–85.

9. Кривцова В.И. Пожаровзрывобезопасность систем хранения водорода автотранспортных средств / В.И. Кривцова, Ю.П. Ключка. – Х.: НУГЗУ, 2013. – 236 с.

10. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 904 с.

11. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М.: Мир, 1985. – 520 с.

12. Нагорный В.С. Устройства автоматики гидро- и пневмосистем / В.С. Нагорный, А.А. Денисов. – М.: Машиностроение, 1991.- 367 с.

13. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г.Б. Двайт. – М.: Наука, 1966. – 228 с.

14. Azarskov VN Reliability of control and automation systems /V.N. Azarskov, V.P. Strelnikov.- К .: NAU, 2004.- 164 p.

References

1. Krivtsova V.I, Oleinikov A.M., Yakovlev A.P. (2007) Inexhaustible energy. Book 4. Wind and hydrogen energy. Kharkiv: Nat. aerospace University "HAI", 606 p.

2. Sorensen B. (2008) Renewables and hydrogen energy technologies for sustainable development. *Int. J. Energy Res.*32. Issue 5: 367-368.

3. Monakhov V.T. (1979) Methods for studying the fire hazard of substances. M.: Chemistry, 424 p.

4. Beschastnov M.V. (1983) Explosion safety and emergency protection of chemical-technological processes. M.: Chemistry, 472 p.

5. Ivanov B.A., Narkunsky S.E., Pleshakov V.F. (1977) A priori estimate of the ignition probability of material-oxygen systems. *Chemical industry*. No. 2, pp.63-67.

6. Borisov V.S., Piskov Yu.K., Popov V.G. (1980) Probabilistic assessment of the fire hazard of an electric circuit. *Sat. tr-in VNIPO. Issue. 16*. P.34-42.

7. Abramov YO, Krivtsova VI, Solovey VV (2002) Hydrogen storage and supply systems based on solids for onboard power plants / - Kh .: 277 p. - ISBN - 966-03-1094-3.

8. Dmitriev AL, Ikonnikov VK (2017) Hydrogen fueling station using hydrogen generation by aluminum powder hydrothermal oxidations. *Int. Scientific J. for Alternative Energy and Ecology. Issue 10*: 75–85.

9. Krivtsova V.I., Key Yu.P. (2013) Fire and explosion safety of hydrogen storage systems for vehicles. Kh.: NUGZU, 236 p.
10. Loitsyansky L.G. (1970) Mechanics of liquid and gas. M.: Nauka, 904 p.
11. Kuhlring H. (1985) Handbook of Physics. M.: Mir, 520 p.
12. Nagorny V.S., Denisov A.A. (1991) Automatic devices for hydro- and pneumatic systems. M.: Mashinostroenie, 367 p.
13. Dwight G.B. (1966) Tables of integrals and other mathematical formulas. M.: Nauka, 228 p.
14. Azarskov V.N., Strelnikov V.P. (2004) Reliability of control and automation systems. K.: NAU, 164 p.

Рецензент: д.т.н., професор, головний науковий співробітник наукового відділу з проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки науково-дослідного центру О.Є. 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: <https://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: <https://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: <https://orcid.org/0000-0002-4116-164X>

METHOD OF DESIGNATION OF THE FIRE SAFETY OF THE GAS GENERATOR WATER SAVING SYSTEMS

Y. Abramov, V. Kryvtsova, A. Mikhailyuk

National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

A method of determining the level of fire danger of the main element of the hydrogen storage and supply system - the gas generator - has been developed. It is noted that to determine the fire hazard level of the gas generator of the hydrogen storage and supply system, methods based on fire hazard indexing and methods aimed at obtaining estimates of the probability of a fire hazard situation are used.

It should be noted that for the purpose of determining the level of fire safety of the gas generator of the system for saving and supplying water, there are methods that are based on the indexation of fire safety and methods that are focused on the assessment of the fire safety of the fire safety situation. In the robot as a showcase, which characterizes the fire rate of the gas generator of the system for saving and supplying water, the ability to change the size of the vice in the empty allowable value is shown. In the robot, the fallow was obtained in the empty gas generator of the system for saving and supplying water in the fallow from the direction. Addiction won for the minds, that the process of supplying water to the cooldown is adiabatic, and the temperatures at the inlet of the reducer and at the same output coincide with each other. It is shown that the direction of the gas generator of the system is to save and supply water and the falloff moment to the hour, at which point the direction is indicated, i.e. the sequence of falloff values. For the purpose of the gas generator of the system, the saving and supply of water is controlled by expressions, as a mathematical description of the improvement of that dispersion. These expressions, as well as expression for the safety of changing the vice in the empty gas generator of the system, saving and supplying water from the normal functions of the normal distribution, ensure the safety of the equal fire safety of such a gas generator. A verbal interpretation was given to the method of determining the fire safety of the gas generator of the system for saving and supplying water, and for the characteristic parameters, the first assessment was made.

Keywords: gas generator, fire safety riven, shifting the value of the allowable value.