

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

Національний університет цивільного захисту України, Україна

ОБГРУНТУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНОГО СТАНУ СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ТА ПОДАЧІ ВОДНЮ

Наведена узагальнена математична модель, яка описує в термінах теорії ймовірності пожежонебезпечний стан системи зберігання та подачі водню. Обґрунтовані вимоги до показників надійності системи контролю пожежонебезпечного стану системи зберігання та подачі водню. Показано, що введення такої системи контролю забезпечує підвищення достовірності функціонування системи зберігання та подачі водню.

Ключові слова: пожежонебезпечність, система контролю, система зберігання та подачі водню.

Постановка проблеми

Серед усіх відомих зелених альтернатив, водень, завдяки своїй кількості та різноманітним джерелам виробництва, стає все більш життєздатним екологічно чистим варіантом для зберігання та транспортування енергії [1].

Виробництво, зберігання, доставка та використання водню є ключовими складовими водневої економіки [2]. Однією із основних проблем при експлуатації водневих систем залишається забезпечення їх безпеки. Вирішення цієї проблеми повинно здійснюватися на різних етапах життєвого циклу водневих систем і, зокрема, систем зберігання та подачі водню. Одним із шляхів по вирішенню такої проблеми є використання автоматичних систем контролю рівня пожежонебезпеки систем зберігання та подачі водню. У цьому випадку виникає питання стосовно обґрунтування вимог до таких систем контролю. Зокрема, це стосується вимог до показників надійності та достовірності систем контролю пожежонебезпечного стану систем зберігання та подачі водню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [3] відмічається, що відсутність даних стосовно надійності систем зберігання водню обмежує можливості їх використання. Автори роботи акцентують свої дослідження на аналізі режимів та наслідків відмов (FMEA) і традиційних інструментах моделювання кількісної оцінки ризиків (QRA), таких як діаграми послідовності подій (ESD) і аналіз дерева несправностей (FTA), для ідентифікації, ранжирування та моделювання сценаріїв ризиків при зберіганні водню. Але при цьому не

розглядається узагальнена математична модель, яка описує пожежонебезпечний стан системи зберігання водню. Підхід до побудови такої моделі представлено в [4]. Модель наведена в узагальненому вигляді і потребує її доповнення у вигляді субмоделей, які описують, зокрема, утворення горючого середовища та появи джерела запалювання. В [5] відмічається, що використання засобів контролю рівня пожежовибухонебезпеки об'єктів дозволяє підвищити достовірність інформації стосовно стану цих об'єктів. Узагальнена інформація стосовно методів та засобів контролю системи зберігання та подачі водню на основі гідрореагуючих складів наведена в [6]. Подальший розвиток цих методів наведено в роботах [7÷11]. В [7] розглядається метод визначення стану газогенератора як основного елемента системи зберігання та подачі водню. В [8,9] наведені методи визначення часового параметра системи зберігання та подачі водню. В роботах [10,11] наведені алгоритми визначення показників надійності та рівня пожежонебезпеки основного елемента системи зберігання та подачі водню. В [12] представлений новітній варіант засобу контролю резервуара високого тиску. Такі резервуари використовуються в газогенераторах систем зберігання та подачі водню. Слід зазначити, що всі ці методи та засоби контролю стану системи зберігання та подачі водню (або її основного елемента – газогенератора) об'єднує те, що їх обґрунтування передбачає визначення параметрів, які характеризують лише динамічні властивості системи [13,14]. Стосовно до обґрунтування показників надійності засобів контролю стану таких систем слід відмітити, що цей напрям досліджень потребує більш детальних досліджень.

Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є обґрунтування показників надійності системи контролю пожежонебезпечного стану системи зберігання та подачі водню.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- навести в термінах теорії ймовірності узагальнену математичну модель, яка описує рівень пожежної безпеки систем зберігання та подачі водню;
- одержати вираз для достовірності функціонування системи зберігання та подачі водню із контролем її рівня пожежної безпеки;
- визначити умови для показників надійності системи контролю рівня пожежної безпеки системи зберігання та подачі водню, які забезпечують підвищення достовірності функціонування таких систем стосовно рівня їх пожежної безпеки.

Виклад основного матеріалу

Пожежонебезпечний стан системи зберігання та подачі водню будемо характеризувати ймовірністю $P_0(t)$, а її пожежонебезпечний стан – ймовірністю $Q(t) = 1 - P_0(t)$.

Ймовірність $Q(t)$ визначається виразом

$$Q(t) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - Q_i(t)], \quad (1)$$

де $Q_i(t)$ – ймовірність виникнення пожежі в i -му елементі системи.

Для $Q_i(t)$ має місце

$$Q_i(t) = 1 - \prod_{k=1}^M \prod_{n=1}^F [1 - Q_{1ik}(t) Q_{2ink}(t)], \quad (2)$$

де $Q_{1ik}(t)$ – ймовірність появи в i -му елементі системи k -го горючого середовища; $Q_{2ink}(t)$ – ймовірність появи в i -му елементі системи n -го джерела запалювання, яке може призвести до займання k -го горючого середовища.

Ймовірність $Q_{1ik}(t)$ формалізується виразом [15]

$$Q_{1ik}(t) = Q_{1i\ell}(t) Q_{1im}(t); k = \ell + 10(m-1), \quad (3)$$

де $Q_{1i\ell}(t)$ – ймовірність появи достатньої кількості ℓ -ї горючої речовини для утворення в i -му елементі системи горючого середовища; $Q_{1im}(t)$ –

ймовірність появи достатньої кількості m -го окислювача для утворення i -му елементі системи горючого середовища. Ці ймовірності визначаються виразами

$$Q_{1i\ell}(t) = 1 - \prod_{\alpha=1}^x [1 - Q_i(a_\alpha)]; \quad (4)$$

$$Q_{1im}(t) = 1 - \prod_{\beta=1}^z [1 - Q_i(b_\beta)]; \quad (5)$$

де $Q_i(a_\alpha)$, $Q_i(b_\beta)$ – ймовірність реалізації будь-якої із a_α , та b_β причин відповідно, що обумовлюють появу відповідно горючої речовини та окислювача в i -му елементі системи.

Для ймовірності $Q_{2ink}(t)$ у першому наближенні можна записати [16]

$$Q_{2ink}(t) = 1 - \exp(-t\tau_0^{-1}), \quad (6)$$

де t – час роботи i -го елемента системи; τ_0 – середній час роботи i -го елемента системи до появи одного джерела запалювання

$$\tau_0 = 3,03 \cdot 10^4 E_0^{1,2}; \quad (7)$$

E_0 – мінімальна енергія запалювання горючого середовища i -го елемента системи.

Сукупність виразів (1)÷(7) визначає узагальнену математичну модель, яка дозволяє оцінити рівень пожежної безпеки системи зберігання та подачі водню.

Якщо стан системи зберігання та подачі водню контролюється за допомогою системи контролю, ймовірність безвідмовної роботи якої є $P_k(t)$, то ймовірність того, що пожежонебезпечна система буде визнана системою контролю як пожежонебезпечна, визначається виразом

$$P_1(t) = P_0(t) P_k(t), \quad (8)$$

Ймовірність правильного визначення пожежонебезпечного стану системи буде описуватися виразом

$$P_2(t) = [1 - P_0(t)] P_k(t) \omega P_b, \quad (9)$$

де ω , P_b – повнота контролю та ймовірність, яка характеризує «неідеальність» методу контролю.

Ймовірності похибок першого роду $P_3(t)$ та другого роду $P_4(t)$ формалізується наступним чином

$$P_3(t) = [1 - P_0(t)][1 - \omega P_B P_k(t)]; \quad (10)$$

$$P_4(t) = P_0(t)[1 - P_k(t)] \quad (11)$$

Достовірне функціонування системи зберігання та подачі водню стосовно її пожежобезпечного стану формалізується ймовірністю

$$P_g(t) = P_1(t) + P_2(t) = 1 - P_3(t) - P_4(t) = P_0(t)P_k(t) + [1 - P_0(t)]\omega P_B P_k(t). \quad (12)$$

Система зберігання та подачі водню, яка включає систему контролю її стану, має більшу достовірність функціонування відносно системи без такого контролю. Відносна величина цього збільшення визначається наступним чином

$$\delta = [P_g(t) - P_0(t)]P_0^{-1}(t), \quad (13)$$

що із врахуванням (12) трансформує цей вираз до вигляду

$$\delta = P_k(t) + [1 - P_0(t)]P_0^{-1}(t)\omega P_B P_k(t). \quad (14)$$

Із фізичних міркувань необхідно, щоб мало місце

$$\delta > 0, \quad (15)$$

внаслідок чого для системи контролю повинна виконуватися умова

$$P_k(t) > [1 + [1 - P_0(t)]P_0^{-1}(t)\omega P_B]^{-1}. \quad (16)$$

Графічна інтерпретація умови (16) наведена на рис.1, на якому зображена функція $f(P_0, \omega P_B)$. Ця функція описує праву частину нерівності (16), внаслідок чого значення ймовірності P_k лежать вище поверхні, яка описується функцією $f(P_0, \omega P_B)$. Наприклад, при $P_0 = 0,99$; $\omega P_B = 0,5$ необхідно щоб $P_k > 0,995$. Слід зазначити, що для параметрів ω та P_B має місце

$$0 < \omega P_B < 1,0, \quad (17)$$

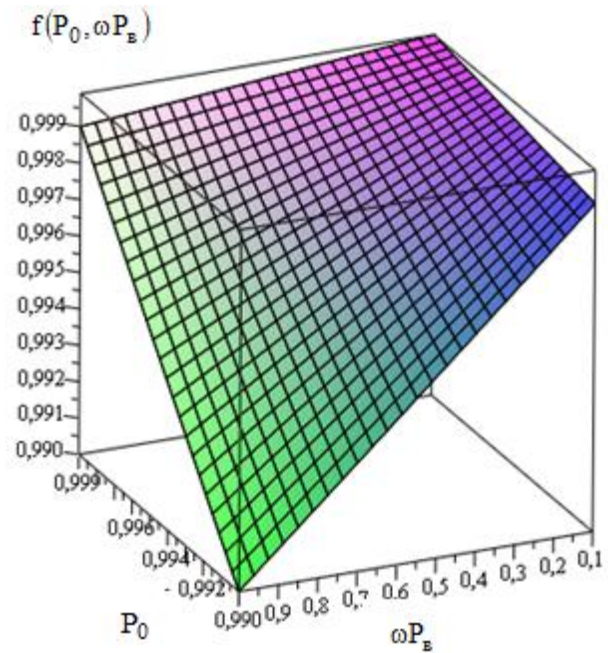


Рис. 1. Залежність $f(P_0, \omega P_B)$

внаслідок чого

$$[1 - P_0(t)]P_0^{-1}(t)\omega P_B < 1,0, \quad (18)$$

що трансформує вираз (16) наступним чином

$$P_k(t) > 1 - [1 - P_0(t)]P_0^{-1}(t)\omega P_B = 1 - Q(t)[1 - Q(t)]^{-1}\omega P_B. \quad (19)$$

Внаслідок того, що $Q \ll 1,0$, то згідно (19) для ймовірності $P_k(t)$ повинна виконуватись умова

$$P_k(t) > 1 - Q(t)\omega P_B. \quad (20)$$

При експоненційному розподілі відмов в системі контролю із (20) витікає умова для узагальненої інтенсивності відмов λ_k системи контролю, яка має вигляд

$$\lambda_k < Q(t)\omega P_B t^{-1}. \quad (21)$$

На рис. 2 представлена графічна інтерпретація умови (21), де наведена функція $f(\omega P_B, t)$ при $Q = 10^{-3}$, яка описує праву частину нерівності (21).

Значення інтенсивності відмов λ_k лежать нижче поверхні, яка описується функцією $f(\omega P_B, t)$. Наприклад, при $\omega P_B = 0,5$; $t = 10^3$ год необхідно, щоб $\lambda_k < 5 \cdot 10^{-7}$ год $^{-1}$.

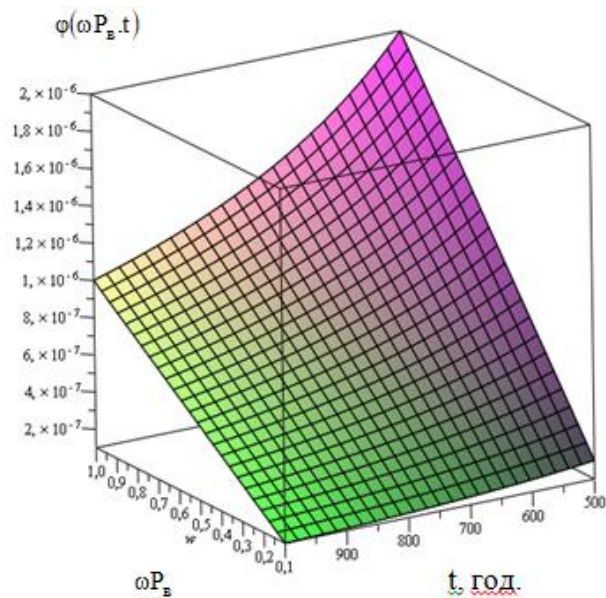


Рис. 2. Залежність $f(\omega P_v, t)$ при $Q=10^{-3}$

Висновки

1. Наведено в термінах теорії ймовірностей узагальнену математичну модель, що описує рівень пожежної небезпеки системи зберігання та подачі водню, складовими якої є субмоделі для утворення горючого середовища та появи джерела запалювання.

2. Побудований вираз для достовірності функціонування системи зберігання та подачі водню із контролем її рівня пожежної небезпеки, який представляє суперпозицію ймовірності того, що пожежобезпечна система буде визначена системою контролю, як пожежобезпечна, та ймовірності правильного визначення пожежонебезпечного стану такої системи.

3. Визначені умови для показників надійності системи контролю рівня пожежної небезпеки системи зберігання та подачі водню, що забезпечують підвищення достовірності її функціонування. Ці умови наведені для ймовірності безвідмовної роботи та інтенсивності відмов системи контролю і враховують ймовірність пожежонебезпечного стану системи зберігання та подачі водню, а також повноту контролю та ймовірність, яка характеризує «неідеальність» методу контролю.

Література

1. Ramin Noradi, Katrina Groth, Hydrogen storage and delivery: Review of the state art technologies and risk and reliability analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 4, Issue 23, 2019, P.12254-12269 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>.
2. I.A.Hassan, Haithan S. Ramadan, Mohamed A. Saleb, Daniel Hissel, Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review Renewable and Sustainable

- Energy Reviews, V. 149, 2021, 111311, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111311>.
3. Camila Correa-Jullian, Katrina Groth, Data requirements for improving the Quantitative Risk Assessment of liquid hydrogen storage systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 47, Issue 6, 2022, P.4222-4235, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.266>.
4. Абрамов Ю.А. Алгоритм обеспечения требуемого уровня пожарной безопасности объекта / Ю.А. Абрамов, В.Е. Росоха, В.И. Кривцова // Проблемы пожарной безопасности. – X.: Фолио, 2000. – Вып. 7. – С. 3–6.
5. Абросимов А.А. Автоматизированные системы пожаровзрывобезопасности нефтеперерабатывающих производств / А.А. Абросимов, Н.Г. Топольский, А.В. Федоров. – М.: Академия ГПС, 2000. – 239с.
6. Абрамов Ю.О. Газогенератори систем зберігання та подачі водню на основі гідрореагуючих складів: моделі, характеристики, методи контролю / Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк. – X.: НУЦЗУ, 2020. – 87.
7. Абрамов Ю.О. Алгоритм контролю технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню в контексті їх пожежної профілактики / Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк // *Комунальне господарство міст – X*, Том 1, вип.161, 2021, С. 284-289, DOI: 10.33042/2522-1809-2021-1-161-284-289.
8. Абрамов Ю.О. Обґрунтування методу визначення постійної часу газогенератора системи зберігання та подачі водню / Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк // *Комунальне господарство міст – X*, Том 3, вип.163, 2021, С. 216-220, DOI: 10.33042/2522-1809-2021-3-163-216-220.
9. Абрамов Ю.О. Метод визначення часового параметра газогенератора системи зберігання та подачі водню / Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк // *Комунальне господарство міст – X*, Том 6, вип.173, 2022, С. 106-110, DOI: 10.33042/2522-1809-2022-6-173-106-110.
10. Абрамов Ю.О. Алгоритм визначення показника надійності газогенератора системи зберігання та подачі водню / Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк // *Комунальне господарство міст – X*, Том 4, вип.164, 2021, С. 153-157, DOI: 10.33042/2522-1809-2021-4-164-153-157.
11. Абрамов Ю.О. Метод визначення рівня пожежонебезпечності газогенератора системи зберігання та подачі водню / Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк // *Комунальне господарство міст – X*, Том 4, вип.171, 2022, С. 107-111, DOI: 10.33042/2522-1809-2022-4-171-107-111.
12. Lu Zhang, Xiaogiang Qu, Shaowei Lu, Xiangmin Wang, Damage monitoring and locating of COPV under low velocity impact using MXene sensor array, *Composites Communications*, V.34, 2022, 101241, <https://doi.org/10.1016/j.coco.2022.101241>.
13. Yu. Abramov Determining the source data to form a control algorithm for hydrogen generators / Yu. Abramov, A. Basmanov, V. Krivtsova, A. Mikhayluk, O. Mikhayluk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 5/9 (101). P. 58-64, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181417>.
14. Yu. Abramov Developing an algorithm for monitoring gas generators of hydrogen storage and supply systems. / Yu. Abramov, A. Basmanov, V. Krivtsova, A. Mikhayluk, O. Mikhayluk // *EUREKA: Physics and Engineering*. 2022. 2. P. 45-54, DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002262>.
15. Абрамов Ю.А. Определение вероятности появления горючей среды в объекте / Ю.А. Абрамов, А.В. Бастеев, В.И. Кривцова // *Проблемы пожарной безопасности. – X.: ХИПБ*, 1999. – С.96-99.

16. Иванов Б.А. Безопасность применения материалов в контакте с кислородом / Б.А. Иванов - М.: Химия, 1984. - 272 с.

References

1. Ramin Noradi, Katrina Groth (2019) Hydrogen storage and delivery: Review of the state art technologies and risk and reliability analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 4, Issue 23, P.12254-12269. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>.
2. I.A. Hassan, Haithan S. Ramadan, Mohamed A. Saleb, Daniel Hissel (2021) Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: *Review Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 149, 111311, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111311>.
3. Camila Correa-Jullian, Katrina Groth (2022) Data requirements for improving the Quantitative Risk Assessment of liquid hydrogen storage systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 47, Issue 6, P.4222-4235, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.266>.
4. Abramov Yu.A., Rosokha V.E., Krivtsova V.I. (2000) Algorithm for ensuring the required level of fire safety of the object. *Problems of fire safety*, V.7. P. 3–6.
5. Abrosimov A.A., Topolsky N.G., Fedorov A.V. (2000) Automated fire and explosion safety systems for oil refineries. M.: Academy of GPS, 239p.
6. Abramov Yu.O., Krivtsova V.I., Mikhailyuk A.O. (2020) Gas generators of systems for saving and supplying water on the basis of hydro-reactive warehouses: models, characteristics, methods of control. Kh.: NUZU, 87.
7. Abramov Yu.O., Krivtsova V.I., Mikhailyuk A.O. (2021) Algorithm for the control of the technical station of gas generators in systems for saving and supplying water in the context of their fire prevention. *Municipal economy of cities*, Volume 1, № 161, P. 284-289, DOI: 10.33042/2522-1809-2021-1-161-284-289.
8. Abramov Yu.O., Krivtsova V.I., Mikhailyuk A.O. (2021) Obstructing the method of assigning a constant hour to the gas generator of the system for saving and supplying water. *Municipal economy of cities*, Volume 3, № 163, P. 216-220, DOI: 10.33042/2522-1809-2021-3-163-216-220.
9. Abramov Yu.O., Krivtsova V.I., Mikhailyuk A.O. (2022) The method of determining the hourly parameter of the gas generator of the system for saving and supplying water. *Municipal economy of cities*, Volume 6, № 173, P. 106-110, DOI: 10.33042/2522-1809-2022-6-173-106-110.
10. Abramov Yu.O., Krivtsova V.I., Mikhailyuk A.O. (2021) Algorithm for determining the indicator of reliability of the gas generator of the system for saving and supplying water. *Municipal economy of cities*, Volume 4, № 164, P. 153-157, DOI: 10.33042/2522-1809-2021-4-164-153-157.
11. Abramov Yu.O., Krivtsova V.I., Mikhailyuk A.O. (2022) The method of determining the level of fire safety of the gas generator of the system for saving and supplying water. *Municipal economy of cities*, Volume 4, № 171, P. 107-111, DOI: 10.33042/2522-1809-2022-4-171-107-111.

12. Lu Zhang, Xiaogiang Qu, Shaowei Lu, Xiangmin Wang, (2022) Damage monitoring and locating of COPV under low velocity impact using MXene sensor array, *Composites Communications*, V.34, 101241, <https://doi.org/10.1016/j.coco.2022.101241>.
13. Abramov Yu., Basmanov A., Krivtsova V., Mikhailyuk A., Mikhailyuk O. (2019) Determining the source data to form a control algorithm for hydrogen generators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5/9 (101). P. 58-64 DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181417>.
14. Abramov Yu., Basmanov A., Krivtsova V., Mikhailyuk A., Mikhailyuk O. (2022) Developing an algorithm for monitoring gas generators of hydrogen storage and supply systems. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2. P. 45-54, DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002262>.
15. Abramov Yu., Basteev A., Krivtsova V. (1999) Determination of the probability of the appearance of a combustible medium in an object. *Problems of fire safety*. P.96-99.
16. Ivanov B.A. (1984) Safety of materials in contact with oxygen. M.: Chemistry, 272 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
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
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
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4116-164X>

JUSTIFICATION OF THE CHARACTERISTICS OF THE FIRE-SAFE CONDITION CONTROL SYSTEM OF THE STORAGE SYSTEM AND HYDROGEN SUPPLY

Y. Abramov, V. Krivtsova, A. Mikhailyuk

National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine

A generalized mathematical model has been introduced to describe the level of fire safety of systems for saving and supplying water, as it is presented in terms of the theory of fire safety. Such a generalized mathematical model takes into account the probability of the appearance of a combustible medium and an ignition source. It is shown that for the appearance of a combustible medium in the hydrogen storage and supply system, it is necessary

and sufficient the simultaneous appearance of a combustible substance and an oxidizer. When determining the probability of an ignition source, an exponential dependence is used, the time constant of which is proportional to the value of the minimum ignition energy of the combustible medium. For the purpose of assessing the level of fire safety of systems for saving and supplying water, the control system is victorious, the functioning of which is characterized by the ability to operate without a driver. This allows you to win against the fluctuations of the health of the systems of saving and supplying water in the fire-safe and fire-safe camps, as well as to gain the counter for the fluctuations of the deaths of the first and other births. The presence of these viruses allows to induce a virus, which reflects the reliability of the functioning of such a water system. It has been wised up for some time to improve the reliability of the functioning of the system for saving and supplying water. Taking this condition into account makes it possible to formulate requirements for the control system, in particular, for the probability of its failure-free operation or for the intensity of its failures. For illustration of these minds, there were some graphical fallows, which allow to again an express assessment of the indicators of reliability and control of water supply systems. It is shown that with total control of this efficiency, which does not seem to be ideal, with an integral indicator of 0,5 and equal to the fire safety of the system for saving and supplying water 0,01, the efficiency of the controllers robotic system is more than 0,995. It should be noted that for the same minds, the control of the system is responsible for saving water supply at equal her fire safety 10^{-3} for an hour interval 10^3 , the intensity of the waters of the control system is no more to blame $5 \cdot 10^{-7} \text{ hour}^{-1}$.

Keywords: fire safety, control system, water supply saving system.