

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

Національний університет цивільного захисту України, Україна

## НОВИЙ ПІДХІД ДО ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ВОДНЕВОЇ СИСТЕМИ

*Показано, що підвищення рівня пожежної безпеки системи зберігання та подачі водню здійснюється шляхом покращення показників надійності її газогенератора. На основі результатів експериментів представлені рекомендації стосовно пасивних та активних варіантів підвищення надійності газогенератора системи зберігання та подачі водню на основі гідрореагуючого складу.*

**Ключові слова:** система зберігання та подачі водню, газогенератор, пожежна безпека, надійність.

### Постановка проблеми

Водневі системи, до яких відносяться системи зберігання та подачі водню, є ключовими складовими водневої економіки [1]. Основною проблемою таких систем є забезпечення їх безпечної експлуатації. Пожежна безпека систем зберігання та подачі водню, як одна із складових загальної безпеки таких систем, забезпечується різними методами та засобами. До скритих резервів таких методів відноситься метод, який передбачає використання специфічних властивостей газогенераторів систем зберігання та подачі водню для підвищення рівня їх пожежної безпеки за рахунок підвищення їх надійності. У зв'язку із цим виникає необхідність у визначенні таких властивостей газогенератора системи зберігання та подачі водню для їх використання по підвищенню надійності газогенератора.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В [2] відмічається, що дані стосовно надійності систем зберігання та подачі водню відсутні. Це стосується і їх основного елемента – газогенератора. В [3] наведені результати досліджень по аналізу факторів ризику, які призводять до водневих логістичних інцидентів. Для виявлення значущих факторів використовується мережевий аналіз. Але результати досліджень не дають відповіді на питання стосовно можливості появи того чи іншого фактору, що обумовлює реалізацію водневого логістичного інциденту. В роботі [4] наведено моделі для одержання оцінок показників надійності газогенератора системи зберігання та подачі водню. При побудові таких моделей використовується традиційний підхід, який враховує як катастрофічні, так і параметричні відмови газогенератора. Але при цьому не враховуються специфічні властивості, які мають місце при генерації водню. Приклад

використання детермінованої залежності тиску в порожнині газогенератора системи зберігання та подачі водню для одержання оцінки показника надійності наведено в [5]. Такий підхід дозволяє враховувати параметричні відмови газогенератора. Одержання ймовірності безвідмовної роботи газогенератора системи зберігання та подачі водню можливе із використанням його узагальнених параметрів [6]. До таких параметрів відносяться постійні часу газогенератора. При реалізації такого підходу виникає необхідність у визначенні цих узагальнених параметрів, що потребує проведення додаткових досліджень. Всі ці підходи стосовно до одержання показників надійності систем зберігання та подачі водню та їх основного елемента – газогенератора об'єднує те, що вони не враховують особливості генерації водню. Це дає підстави для проведення досліджень стосовно процесу генерації водню, спрямованих на підвищення рівня пожежної безпеки водневих систем.

### Мета та завдання дослідження

Метою роботи є виявлення нових можливостей для підвищення рівня пожежної безпеки водневих систем на прикладі системи зберігання та подачі водню за рахунок підвищення її надійності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати доцільність визначених внутрішніх характеристик основного елемента системи зберігання та подачі водню – газогенератора в контексті їх впливу на його надійність;
- експериментальним шляхом визначити внутрішні характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню на основі гідрореагуючого складу та виявити особливості процесу генерації водню;

- розробити пропозиції по підвищенню надійності газогенератора системи зберігання та подачі водню, як складової рівня її пожежної безпеки.

### Виклад основного матеріалу

Загальний підхід при одержанні оцінок, які характеризують рівень пожежної небезпеки систем зберігання та подачі водню, зводиться до визначення ймовірності  $Q(t)$

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

де  $Q_i(t)$  – ймовірність виникнення пожежі в  $i$ -тому елементі системи [7].

Вираз для  $Q_i(t)$  можна представити у вигляді

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

де  $Q_{lik}(t)$  – ймовірність появи в  $i$ -тому елементі системи  $k$ -того горючого середовища;  $Q_{2ink}(t)$  – ймовірність появи в  $i$ -тому елементі системи  $n$ -го джерела запалювання, яке може призвести до займання  $k$ -того горючого середовища. Визначення складових ймовірності  $Q_i(t)$ , як правило, потребує використання експертних оцінок, що може призвести до появи похибки, яка має суб'єктивний характер. В [3] показано, що послабити вплив суб'єктивного фактора на оцінку рівня пожежної небезпеки системи зберігання та подачі водню можливо, якщо замість ймовірності появи фрагментів горючого середовища в  $i$ -тому її елементі використовувати ймовірність відмов відповідних елементів системи.

В системі зберігання та подачі водню центральним елементом, який визначає її безвідмовність є газогенератор. Забезпечення надійності газогенератора системи зберігання та подачі водню здійснюється на етапі проектування, реалізується на етапі виробництва та підтримується на етапі експлуатації. На етапі проектування необхідно передбачити втілення в газогенераторі системи зберігання та подачі водню методів та засобів, які унеможливають або послаблюють дію факторів, що негативно впливають на рівень його безвідмовності.

Розглянемо один із прикладів такого підходу.

Дифузійні хімічні реакції між твердим тілом та рідиною, які протікають із виділенням газоподібної фази, відрізняються тією особливістю, що бульбашки газу, які утворюються в процесі росту та

відриву від твердої поверхні, турбулізують пограничний шар рідини і суттєво впливають на процес тепломасообміну. Механізм процесу взаємодії твердого тіла із рідким реагентом, що супроводжується газовиділенням (так зване хімічне кипіння), визначається актами зародження, росту та відриву бульбашок [8]. Іншими словами, тепломасообмін в подібних процесах залежить від внутрішніх характеристик цих процесів: щільності центрів газовиділення  $N$ , відривного діаметра бульбашок  $d_0$  та частоти газоутворення  $f$ .

Для визначення внутрішніх характеристик газогенератора системи зберігання та подачі водню із гідрореагуючим зразком використовується установка, схема якої наведена на рис.1.

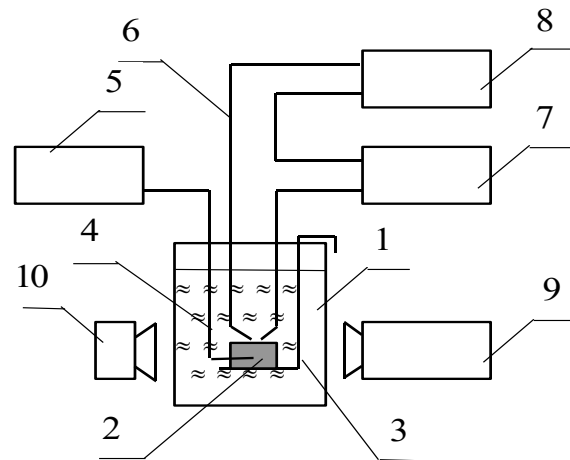


Рис.1. Схема експериментальної установки: 1 - реакційна ємність; 2- гідрореагуючий зразок; 3 – підкладка; 4 – терморпара; 5 – реєстратор температури (КСП-4); 6 – електричний ланцюг із електродами; 7 – блок живлення; 8 – осцилограф; 9 – кінокамера; 10 – джерело світла

В якості гідрореагуючого зразка використовувались пігулки на основі алюмогідриду натрію (АГН) діаметром (0,5 ÷ 25,0) мм і висотою (7,0 ÷ 8,0) мм. В якості реєструючих пристроїв використовувались осцилограф Н-117/1 та високошвидкісна кінокамера СКС-1М [9]. Частота газоутворення визначалась кондуктометричним та фотометричним методами. Результати, які одержані цими методами, практично не відрізняються між собою. Визначення внутрішніх характеристик газогенератора проводилось для вертикального положення реагуючої поверхні, а також для горизонтальних реагуючих поверхонь (верхньої та нижньої). На рис. 2 наведена залежність відривного діаметра  $d_0$  газової бульбашки від діаметра  $d_p$  реагуючої поверхні для різного розташування цієї поверхні.

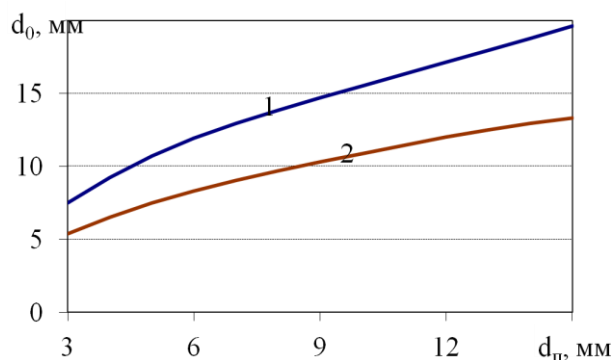


Рис.2. Залежність відривного діаметра газової бульбашки від діаметра реагуючої поверхні: 1 – вертикальне розташування реагуючої поверхні; 2 – горизонтальне розташування реагуючої поверхні

На рис.3 наведена залежність частоти  $f$  відриву газової бульбашки від діаметра  $d_n$  реагуючої поверхні для різного розташування цієї поверхні.

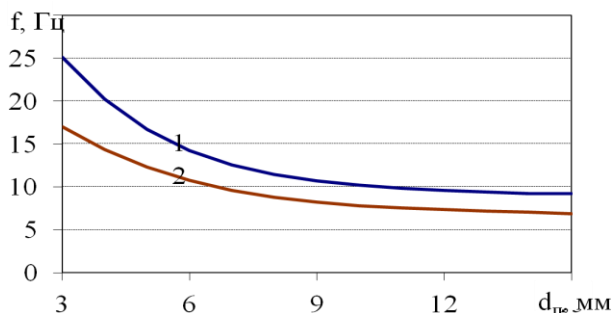


Рис.3. Залежність частоти відриву газової бульбашки від діаметра реагуючої поверхні: 1 – вертикальне розташування реагуючої поверхні; 2- горизонтальне розташування реагуючої поверхні

Апроксимація залежностей  $d_0 = d_0(d_n)$  та  $f = f(d_n)$  здійснювалась поліномами четвертого порядку.

$$d_0 = \sum_{i=0}^4 a_i d_n^i; f = \sum_{j=0}^4 b_j d_n^j; \quad (3)$$

де  $a_i, b_j$  – параметри, значення яких наведені в табл. 1 та в табл. 2.

Таблиця 1

Значення параметрів  $a_i$

$a_i$	Вертик. розт. пов.	Гориз. розт. пов.
$a_4, \text{мм}^{-3}$	$-4,0 \cdot 10^{-4}$	$-3,6 \cdot 10^{-4}$
$a_3, \text{мм}^{-2}$	0,0196	0,0145
$a_2, \text{мм}^{-1}$	-0,352	-0,230
$a_1, \text{мм}^0$	3,561	2,269
$a_0, \text{мм}$	-0,5	0,3

Таблиця 2

Значення параметрів  $b_j$

$b_j$	Вертик. розт. пов.	Гориз. розт. пов.
$b_4, \text{Гц} \cdot \text{мм}^{-4}$	0,0016	0,0003
$b_3, \text{Гц} \cdot \text{мм}^{-3}$	-0,078	-0,021
$b_2, \text{Гц} \cdot \text{мм}^{-2}$	1,450	0,514
$b_1, \text{Гц} \cdot \text{мм}^{-1}$	-12,4	-5,5
$b_0, \text{Гц}$	51,2	29,4

Із результатів експериментів витікає наступне:

- процес генерації водню припиняється, якщо газові бульбашки повністю покривають реагуючу поверхню гідрореагуючого зразка;

- внутрішні характеристики газогенератора залежать від орієнтації реагуючої поверхні гідрореагуючого зразка;

- при вертикальній орієнтації реагуючої поверхні зразка газова бульбашка після відриву з місця її формування піднімається вздовж реагуючої поверхні і з'єднується із іншими газовими бульбашками. При цьому зростає об'єм газової бульбашки;

- найбільш несприятливим режимом газогенерації є випадок, коли реагуюча поверхня зразка орієнтована вниз. У цьому випадку зростання газової бульбашки обумовлено зростанням її діаметра. Газова бульбашка приймає форму плоского сфероїда, який притискається до горизонтально розташованої реакційної поверхні зразка і унеможливує доступ до нього води;

- збільшення діаметра  $d_n$  реагуючої поверхні призводить до збільшення діаметра  $d_0$  газових бульбашок і, як наслідок, веде до збільшення підйомної сили, яка діє на ці газові бульбашки. При збільшенні діаметра  $d_n$  в 5,0 разів діаметр  $d_0$  збільшується в (2,3 ÷ 2,5) разів;

- збільшення діаметра  $d_n$  реагуючої поверхні зразка призводить до зниження частоти  $f$  газоутворення. При зміні  $d_n$  в 5,0 разів має місце зниження частоти  $f$  в 3,2 рази для вертикального розташування реагуючої поверхні і в 2,3 рази для горизонтально розташованої реагуючої поверхні;

- швидкість росту газових бульбашок практично не залежить від діаметра  $d_n$  реагуючої поверхні, а величина цієї швидкості для вертикального розташування реагуючої поверхні на декілька відсотків більша, ніж при її горизонтальному розташуванні.

Виявленні особливості генерації водню в газогенераторі відкривають нові можливості для підвищення його надійності. При цьому можливі два варіанти для підвищення надійності газогенератора – пасивний та активний. При реалізації першого варіанту гідрореагуючий зразок

виконується поліподібним у вигляді  $n$  прямих кругових циліндрів радіуса  $r$  і висоти  $H$ , для яких виконується умова  $r < H$ . Якщо  $R$  – радіус моноподібного циліндричного гідрореагуючого зразка висоти  $H$ , то при  $n = 7$  і при  $R = 3r$  площа реагуючої поверхні для поліподібного зразка буде в 2,3 рази більше у порівнянні із моноподібним зразком.

Реалізація другого варіанту для підвищення надійності газогенератора пов'язана із формуванням гідродинамічних сил, які діють на газові бульбашки для їх відриву від реагуючих поверхонь. Величина цих сил залежить від розмірів газових бульбашок, а також від швидкості руху рідини [10]. На рис. 4 наведена схема системи зберігання та подачі водню, в якій реалізовані обидва варіанти по підвищенню надійності газогенератора [11].

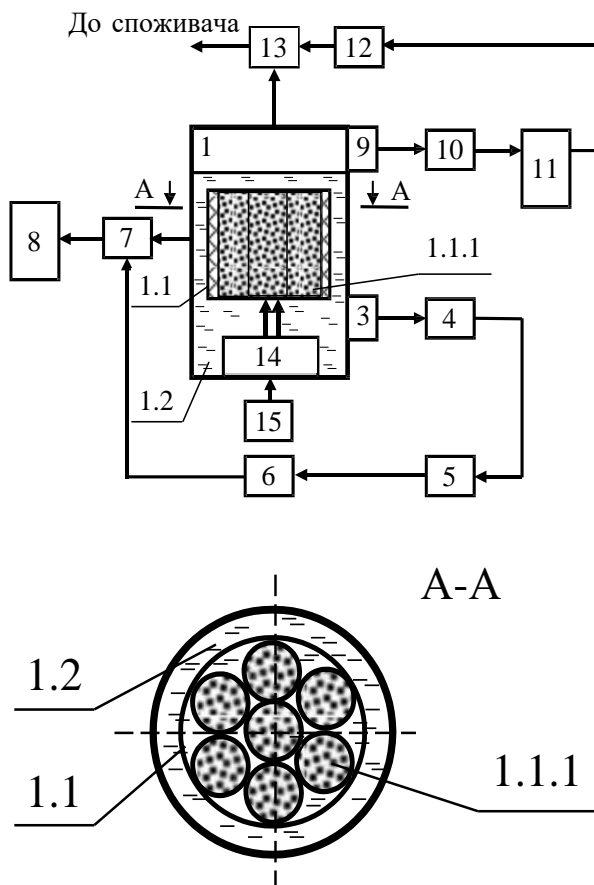


Рис.4. Схема системи зберігання та подачі водню: 1 – газогенератор; 2 – сітчаста касета; 1.1.1 – зразки гідрореагуючого складу; 1.2 – вода; 3 – датчик рівня води; 4,10 – підсилювачі; 5,11 – тригери; 6,12 – підсилювачі потужності; 7,13 – електромагнітні клапани; 8 – ємність для компенсації; 9 – датчик тиску; 14 – вібраційний пристрій; 15 – система управління

В такій системі формування гідродинамічних сил, які діють на газові бульбашки, здійснюється за допомогою вібраційного пристрою 14. Цей вібраційний пристрій забезпечує вібропереміщення сітчастої касети 1.1 із зразками гідрореагуючого складу 1.1.1 вздовж поздовжньої осі газогенератора 1.

Підвищення надійності газогенератора – основного елемента системи зберігання та подачі водню і, як наслідок, підвищення рівня пожежної безпеки такої системи забезпечується шляхом примусового видалення газових бульбашок з реагуючої поверхні гідрореагуючого зразка внаслідок дії гідродинамічних сил.

## Висновки

1. Показана необхідність врахування внутрішніх характеристик газогенератора системи зберігання та подачі водню для підвищення його надійності, що обумовлено залежністю його працездатності від цих характеристик.

2. Експериментально для гідрореагуючих зразків на основі алюмогідриду натрію одержані залежності відривного діаметра газової бульбашки, які мають місце при генерації водню, від діаметра реагуючої поверхні та частоти відриву цих газових бульбашок від діаметра реагуючої поверхні. Одержані залежності апроксимовані поліномами четвертого порядку. Показано, що для підвищення надійності газогенератора необхідно збільшувати діаметр реагуючої поверхні гідрореагуючого зразка, а ця поверхня повинна мати вертикальне розташування;

3. Рекомендовано підвищення надійності газогенератора здійснювати шляхом виконання гідрореагуючого зразка поліподібним, а на газові бульбашки здійснювати силову дію, яка має гідродинамічну природу внаслідок вібраційного переміщення гідрореагуючого зразка.

## Література

1. A. Hassan, Haithan S. Ramadan, Mohamed A. Saleb, Daniel Hissel (2021) Hydrogen sbradatetechnologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111311. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111311>
2. Camila Correa-Jullian, Katrina Groth (2022) Data reguiremntnts for improving the Quantitative Risk Assessment of liquid hydrogen storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 6, 4222-4235. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.266>
3. Lam, C.Y., Fuse, M., Shimizu, T. (2019). Assessment of risk factors and effects in hydrogen logistics incidents from a network modeling perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 36, 20572-20586. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.187>
4. 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(10(122)), 47-54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276099>

5. Абрамов Ю.О. Метод визначення рівня пожежонебезпеки газогенератора системи зберігання та подачі водню / Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк // *Комунальне господарство міст.* - Том 4, вип.171. – 2022. - С. 107-111. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-4-171-107-111>

6. 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.* -Том 4, вип.164. – 2021. -С. 153-157. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-4-164-153-157>

7. Абрамов Ю.О. Обґрунтування характеристик системи контролю пожежонебезпечного стану системи зберігання та подачі водню / Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк // *Комунальне господарство міст.* - Том 1, вип.175. – 2023. - С. 125-130. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-125-130>

8. Абрамов Ю.О. Газогенератори систем зберігання та подачі водню на основі гідро реагуючих складів: моделі, характеристики, методи контролю / Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк // *Х.:НУЦЗУ*, 2020. – 87 с.

9. Абрамов Ю.О., Кривцова В.И., Соловей В.В. Системы хранения и подачи водорода на основе твердых веществ для бортовых энергетических установок / Ю.А. Абрамов, В.И. Кривцова, В.В. Соловей. – *Х.:* 2002. – 277 с.

10. Нагорный В.С. Пристрої автоматики гідро та пневмосистем / В.С. Нагорний, А.А. Денисов, 1991. – 367 с.

11. Система зберігання та подачі водню: Пат. 134467 Україна: МПК G01B 3/06/ Абрамов Ю.О., Іценко І.В., Кривцова В.І., Фуніков А.С., заяв. та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. – №201809104; заяв. 03.09.2018; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10.

## References

1. A. Hassan, Haithan S. Ramadan, Mohamed A. Saleb, Daniel Hissel (2021) Hydrogen sbiradetechnologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111311. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111311>
2. Camila Correa-Jullian, Katrina Groth (2022) Data requirmentnts for improving the Quantitative Risk Assessment of liquid hydrogen storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 6, 4222-4235. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.266>
3. Lam, C.Y., Fuse, M., Shimizu, T. (2019). Assessment of risk factors and effects in hydrogen logistics incidents from a network modeling perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 36, 20572-20586. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.187>
4. Abramov Yu., Vasmanov, O., Krivtsova, V., Mikhaylyuk, 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(10(122)), 47-54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276099>
5. Abramov Yu., Krivtsova V., Mikhaylyuk A. (2022) Method of designation of the fire safety of the gas generator

water saving systems. *Municipal Economy of Cities*, 4(171), 107–111. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-4-171-107-111>

6. Abramov Yu., Krivtsova V., Mikhaylyuk A. (2021) Algorithm for determination of reliability indicator of gas generator of hydrogen storage and supply system. *Municipal Economy of Cities*, 4(164), 153–157. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-4-164-153-157>

7. Abramov Yu., Krivtsova V., Mikhaylyuk 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. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-125-130>

8. Abramov Yu., Krivtsova V., Mikhaylyuk A. (2020) Gas generators of hydrogen storage and supply systems based on hydro-reactive compositions: models, characteristics, control methods. *Kh.: NUZZU*, 87.

9. Abramov Yu., Krivtsova V., Solovey V. (2002) Hydrogen storage and supply systems based on solids for onboard power plants, 277.

10. Nagorny V., Denisov A. (1991) Automatic devices for hydro and pneumatic systems, 367.

11. Abramov Yu., Ishchenko I., Krivtsova V., Funikov A. (2019) System for saving and supplyin g water: Pat. 134467 Ukraine: IPC G01B 3/06/ App. and patent holder of the National University of Civil Defense of Ukraine. No. 201809104; dec. 09/03/2018; publ. May 27, 2019, Bull. No. 10.

**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.

**Автор:** АБРАМОВ Юрій Олександрович доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник науково-дослідного центру Національний університет цивільного захисту України

E-mail - [abramov121146@gmail.com](mailto: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](mailto: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.nucz@gmail.com](mailto:mihayluk.nucz@gmail.com)

ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4116-164X>

## NEW PERSPECTIVES ON THE MOVEMENT OF FIRE SAFETY WATER SYSTEMS

Y. Abramov, V. Kryvtsova, A. Mikhailyuk

National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine

*When obtaining estimates that characterize the level of fire safety of the hydrogen storage and supply system, there is an error due to the subjective nature of its occurrence. It is noted that it is possible to weaken the influence of the subjective nature on these estimates by using the probabilistic characteristics of failure of the main elements of the hydrogen storage and supply system. Such basic elements include a gas generator. It is shown that the diffusion processes between the hydroreactive sample and the liquid - water are accompanied by the appearance of gas bubbles located on the reacting surface. This process - chemical boiling is characterized by internal characteristics. Internal characteristics were obtained experimentally for hydroreactive samples based on sodium aluminum hydride, which are approximated by polynomials of the fourth order and represent the dependence of the diameter of gas bubbles and the generation frequency on the diameter of the reacting surface. It is noted that the characteristics of the gas generator depend on the orientation of the reacting surfaces of the hydroreactive sample. The growth rate of basic bubbles practically does not depend on the diameter of the reacting surface, and the size of this surface for the vertical arrangement of the reacting surface is several percent larger than for its horizontal arrangement. The most unfavorable mode of gas generation is the case when the reactive surface of the hydroreactive sample is oriented downwards. It is shown that increasing the reliability of the gas generator of the hydrogen storage and supply system is possible due to the implementation of a hydroreactive sample with a polylike one - a passive method and due to the formation of hydrodynamic forces acting on gas bubbles - an active method. These recommendations are embodied on the example of a hydrogen storage and supply system with vibrational movement of a hydroreactive sample, which is made in the form of a set of identical long cylinders assembled in a mesh cassette.*

**Keywords:** water saving and supply system, gas generator, fire safety, reliability.