

*В.И. Кривцова, д-р техн. наук, профессор, проректор, УГЗУ,
Ю.П. Ключка, к.т.н., ст. науч. сотр., УГЗУ*

ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОЙ СИТУАЦИИ В СИСТЕМЕ ХРАНЕНИЯ И ПОДАЧИ ВОДОРОДА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМА ЕЕ РАБОТЫ

Получено упрощенное выражение для оценки уровня пожаровзрывоопасности системы хранения и подачи водорода, учитывающее нагрузку на элементы системы. Установлена зависимость вероятности возникновения пожаровзрывоопасной ситуации от времени, коэффициента нагрузки и времени между возникновением и ликвидацией источника зажигания или горючей среды.

Постановка проблемы. Одним из показателей опасности системы хранения и подачи (СХП) водорода является вероятность возникновения пожаровзрывоопасной (ПВО) ситуации [1, 2], которая, как правило, определяется на интервале 1 год. При этом проблемой является получение адекватных значений уровня ПВО СХП с учетом характеристик элементов СХП, системы автоматики и режимов ее работы.

Анализ последних достижений и публикаций. В работе [3] было получено выражение для определения уровня ПВО СХП с учетом времени $\Delta\tau$ – между возникновением и ликвидацией источника зажигания или горючей среды

$$P_{\text{СХП}} = \sum_{n=1}^N \left[\int_{(n-1)\Delta\tau}^{n\Delta\tau} (\lambda_A e^{-\lambda_A \cdot t}) dt \cdot \int_{(n-1)\Delta\tau}^{n\Delta\tau} (\lambda_B e^{-\lambda_B \cdot t}) dt \right], \quad (1)$$

где λ_A (λ_B) – суммарная интенсивность отказов элементов СХП, которые могут привести к возникновению горючей среды (ГС) (источника зажигания (ИЗ)); $\Delta\tau$ – промежуток времени, в течении которого возможны два события – возникновение горючей среды и источника зажигания (фиксированное время, которое можно интерпретировать, как время между возникновением и ликвидацией источника зажигания или горючей среды); N – количество интервалов $\Delta\tau$, $N = \tau / \Delta\tau$; τ – время, для которого определяется уровень ПВО СХП водорода.

В работе [4], путем преобразований выражения (1), было получено упрощенное выражение для оценки уровня ПВО СХП водорода

$$P_{\text{СХП}} = F \cdot \sum_{n=1}^N e^{f \cdot n}, \quad (2)$$

где

$$F = (e^{\lambda_A \Delta \tau} - 1)(e^{\lambda_B \Delta \tau} - 1), \quad (3)$$

$$f = -(\lambda_A + \lambda_B) \Delta \tau. \quad (4)$$

Однако, полученные зависимости не позволяют учитывать режимы работы СХП, и соответственно их влияние на уровень безопасности.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является получение выражения для вероятности возникновения ПВО ситуации в СХП водорода, с помощью которого могут быть получены оценки этого показателя.

По аналогии с (2) получим выражение для определения уровня ПВО СХП водорода, с учетом того, что $\lambda_A(T)$ и $\lambda_B(T)$ являются функциями времени

$$P_{\text{СХП}} = \sum_{n=1}^N F(T) \cdot e^{f(T) \cdot n}, \quad (5)$$

где

$$F(T) = (e^{\lambda_A(T) \Delta \tau} - 1)(e^{\lambda_B(T) \Delta \tau} - 1), \quad (6)$$

$$f(T) = -(\lambda_A(T) + \lambda_B(T)) \Delta \tau. \quad (7)$$

Из [2] следует, что значения $\lambda_A(T)$ и $\lambda_B(T)$, можно определять через коэффициенты нагрузки на элементы СХП, т.е.

$$\lambda_A(T) = \zeta_A \cdot \lambda_A \text{ и } \lambda_B(T) = \zeta_B \cdot \lambda_B, \quad (8)$$

где ζ_A и ζ_B – коэффициенты нагрузки.

Тогда выражение (5) можно записать в виде

$$P_{\text{СХП}} = \sum_{n=1}^N [(e^{\zeta_A \lambda_A \Delta \tau} - 1)(e^{\zeta_B \lambda_B \Delta \tau} - 1) \cdot e^{-(\zeta_A \lambda_A + \zeta_B \lambda_B) \Delta \tau \cdot n}]; \quad (9)$$

$$P_{\text{СХП}} = \sum_{n=1}^N \frac{(e^{\Delta \tau \zeta_A \lambda_A} - 1)(e^{\Delta \tau \zeta_B \lambda_B} - 1)}{e^{(\zeta_A \lambda_A + \zeta_B \lambda_B) \Delta \tau \cdot n}}. \quad (10)$$

Преобразовав выражение (10), его можно записать в следующем виде

$$P_{\text{СХП}} = \sum_{n=1}^N \frac{\Delta\tau \zeta_{A(n)} \lambda_A \cdot \Delta\tau \zeta_{B(n)} \lambda_B}{e^{(\zeta_{A(n)} \lambda_A + \zeta_{B(n)} \lambda_B) \Delta\tau \cdot n}}, \quad (11)$$

$$P_{\text{СХП}} = \sum_{n=1}^N \frac{\Delta\tau \zeta_{A(n)} \lambda_A \cdot \Delta\tau \zeta_{B(n)} \lambda_B}{(1 + (\zeta_{A(n)} \lambda_A + \zeta_{B(n)} \lambda_B) \Delta\tau)^n}. \quad (12)$$

С целью упрощения выражение (13) примем, что $\zeta_{A(n)} = \zeta_{B(n)} = \zeta_n$, причем ζ_n будем определять как максимальное значение среди $\zeta_{A(n)}$ и $\zeta_{B(n)}$

$$P_{\text{СХП}} = \sum_{n=1}^N \frac{\Delta\tau^2 \lambda_A \lambda_B \cdot \zeta_n^2}{(1 + \zeta_n (\lambda_A + \lambda_B) \Delta\tau)^n}. \quad (13)$$

Введем переменную H , которая будет определяться как $H = N / \Delta\tau$, тогда ее физический смысл – это количество часов, т.е. время для которого будет определяться вероятность возникновения ПВО ситуации.

С учетом этого выражение (13) примет следующий вид

$$P_{\text{СХП}} = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{1/\Delta\tau} \frac{\Delta\tau^2 \lambda_A \lambda_B \zeta_h^2}{(1 + \zeta_h (\lambda_A + \lambda_B) \Delta\tau)^{((h-1)/\Delta\tau + i)}}, \quad (14)$$

где ζ_h – коэффициенты нагрузки на протяжении часа h .

В результате преобразований, выражение (14) может быть представлено в следующем виде

$$P_{\text{СХП}} = \Delta\tau^2 \lambda_A \lambda_B \cdot \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{1/\Delta\tau} \left[\zeta_h^2 \left(\frac{1}{1 + \zeta_h (\lambda_A + \lambda_B) \Delta\tau} \right)^{\frac{h-1}{\Delta\tau}} \left(\frac{1}{1 + \zeta_h (\lambda_A + \lambda_B) \Delta\tau} \right)^i \right], \quad (15)$$

$$P_{\text{СХП}} = \Delta\tau^2 \lambda_A \lambda_B \cdot \sum_{h=1}^H \zeta_h^2 \left[\left(\frac{1}{1 + \zeta_h (\lambda_A + \lambda_B) \Delta\tau} \right)^{\frac{(h-1)}{\Delta\tau}} \sum_{i=1}^{1/\Delta\tau} \left(\frac{1}{1 + \zeta_h (\lambda_A + \lambda_B) \Delta\tau} \right)^i \right], \quad (16)$$

$$P_{\text{СХП}} = \Delta\tau^2 \lambda_A \lambda_B \cdot \sum_{h=1}^H \zeta_h^2 \left[\left(\frac{1}{1 + \zeta_h (\lambda_A + \lambda_B) \Delta\tau} \right)^{\frac{h-1}{\Delta\tau}} \frac{1 - (1 + \zeta_h (\lambda_A + \lambda_B) \Delta\tau)^{-1/\Delta\tau}}{\zeta_h (\lambda_A + \lambda_B) \Delta\tau} \right], \quad (17)$$

$$P_{\text{СХП}} = \frac{\Delta\tau\lambda_A\lambda_B}{(\lambda_A + \lambda_B)} \cdot \sum_{h=1}^H \zeta_h \left[\left(\frac{1}{1 + \zeta_h(\lambda_A + \lambda_B)\Delta\tau} \right)^{\left(\frac{h-1}{\Delta\tau}\right)} \left(1 - \frac{1}{(1 + \zeta_h(\lambda_A + \lambda_B)\Delta\tau)^{\frac{1}{\Delta\tau}}} \right) \right]. \quad (18)$$

Введем переменную D , которая будет определяться как $D = H/24$, тогда ее физический смысл – это количество дней, т.е. время для которого будет определяться вероятность возникновения ПВО ситуации.

С учетом этого выражение (18) примет следующий вид

$$P_{\text{СХП}} = \frac{\Delta\tau\lambda_A\lambda_B}{(\lambda_A + \lambda_B)} \cdot \sum_{d=1}^D \sum_{h=1}^{24} \zeta_h \left[\left(\frac{1}{1 + \zeta_h(\lambda_A + \lambda_B)\Delta\tau} \right)^{\left(\frac{(d-1)24+h-1}{\Delta\tau}\right)} \left(1 - \frac{1}{(1 + \zeta_h(\lambda_A + \lambda_B)\Delta\tau)^{\frac{1}{\Delta\tau}}} \right) \right]. \quad (19)$$

Введем переменную

$$\eta_h = \left(\frac{1}{1 + \zeta_h(\lambda_A + \lambda_B)\Delta\tau} \right)^{\frac{1}{\Delta\tau}}, \quad (20)$$

тогда выражение (19) можно привести к виду

$$P_{\text{СХП}} = \frac{\Delta\tau\lambda_A\lambda_B}{(\lambda_A + \lambda_B)} \cdot \sum_{d=1}^D \sum_{h=1}^{24} [\zeta_h \eta_h^{24d-24+h-1} (1 - \eta_h)], \quad (21)$$

$$P_{\text{СХП}} = \frac{\Delta\tau\lambda_A\lambda_B}{(\lambda_A + \lambda_B)} \cdot \sum_{d=1}^D \sum_{h=1}^{24} (\zeta_h (\eta_h^{24})^d \eta_h^{h-25} (1 - \eta_h)). \quad (22)$$

Введем переменные

$$\psi_h = \zeta_h \eta_h^{h-25} (1 - \eta_h); \quad (23)$$

$$\omega_h = \eta_h^{24}, \quad (24)$$

тогда выражение (22) можно привести к виду

$$P_{\text{СХП}} = \frac{\Delta\tau\lambda_A\lambda_B}{(\lambda_A + \lambda_B)} \cdot \sum_{d=1}^D \sum_{h=1}^{24} (\psi_h \omega_h^d). \quad (25)$$

В результате перестановки символов суммирования, выражение (25) можно привести к виду

$$P_{\text{СХП}} = \frac{\Delta\tau\lambda_A\lambda_B}{(\lambda_A + \lambda_B)} \cdot \sum_{h=1}^{24} \left[\Psi_h \sum_{d=1}^D \omega_h^d \right]. \quad (26)$$

Дальнейшие преобразования позволяют записать выражение (26) в следующем виде

$$P_{\text{СХП}} = \frac{\Delta\tau\lambda_A\lambda_B}{(\lambda_A + \lambda_B)} \cdot \sum_{h=1}^{24} \left[\Psi_h \frac{\omega_h^{D+1} - \omega_h}{\omega_h - 1} \right]. \quad (27)$$

Из выражения (27) следует, что вероятность возникновения аварийной ситуации на интервале один час, в течении времени D , будет определяться следующим выражением

$$P_{\text{СХП}(h)} = \Psi_h \frac{\Delta\tau\lambda_A\lambda_B(\omega_h^{D+1} - \omega_h)}{(\lambda_A + \lambda_B)(\omega_h - 1)}. \quad (28)$$

На рис. 1 и рис.2, в соответствии с выражением (28), приведены зависимости $P_{\text{СХП}(h)}$ от коэффициента нагрузки и времени h (при $D=365$, т.е. 1 год).

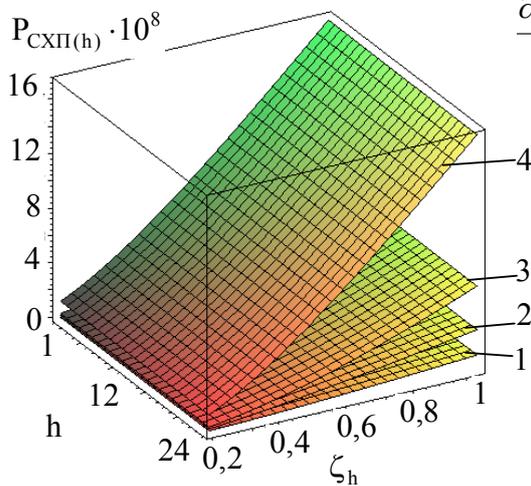


Рисунок 1 – Зависимость вероятности возникновения ПВО ситуации на протяжении одного года в интервале времени 1час от коэффициента нагрузки и времени h :

1, 3– $\lambda_A = \lambda_B = 50 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; 2, 4– $\lambda_A = \lambda_B = 100 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; 1, 2– $\Delta\tau = 1/60 \text{ ч}$; 3, 4– $\Delta\tau = 1/10 \text{ ч}$

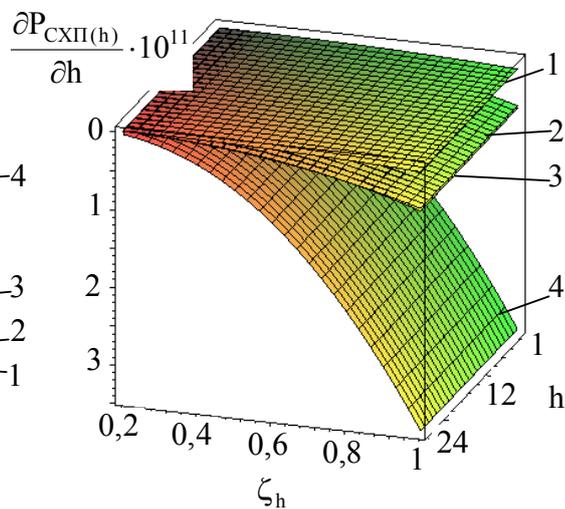


Рисунок 2 – Зависимость скорости изменения вероятности возникновения ПВО ситуации на протяжении одного года в интервале времени 1час от коэффициента нагрузки и времени h :

1, 3– $\lambda_A = \lambda_B = 50 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; 2, 4– $\lambda_A = \lambda_B = 100 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; 1, 2– $\Delta\tau = 1/60 \text{ ч}$; 3, 4– $\Delta\tau = 1/10 \text{ ч}$

Из рис.1 следует, что увеличение $\lambda_B, \lambda_A, \Delta\tau$ и ζ_h влечет за собой увеличение $P_{СХП(h)}$, в то время как значение h , практически не оказывает никакого воздействия на величину $P_{СХП(h)}$. Из рис. 2 следует, что наибольшая скорость изменения $P_{СХП(h)}$ наблюдается при высоких значениях λ_B, λ_A и ζ_h . Из рис. 1. и рис. 2 можно сделать вывод, что изменение h на единицу влечет за собой изменение $P_{СХП(h)}$ менее чем на 0,1%. Учитывая незначительное влияние h на конечное значение $P_{СХП(h)}$, в расчетах можно пренебречь его изменением, в частности, в выражении (24) – возведение в степень.

На рис. 3 приведены зависимости $P_{СХП(h)}$ от $\Delta\tau$ и ζ_h при различных значениях λ_B и λ_A , а на рис. 4 зависимости относительного значения $\frac{P_{СХП(h)}}{(\Delta\tau \cdot \zeta_h)}$.

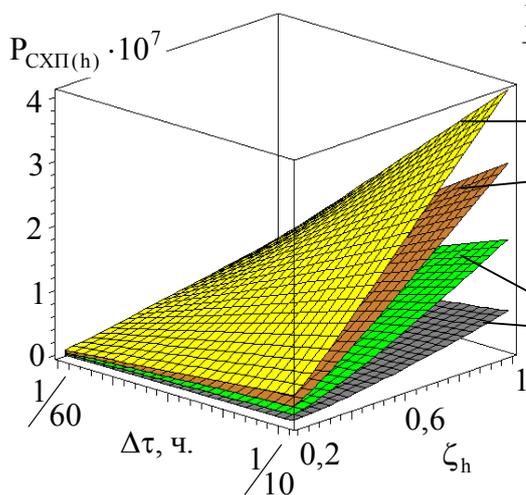


Рисунок 3 – Зависимость вероятности возникновения ПВО ситуации на протяжении одного года в интервале времени 1 час от коэффициента нагрузки и времени $\Delta\tau$:
 1 – $\lambda_A = \lambda_B = 50 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; 2 – $\lambda_A = \lambda_B = 100 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; 3 – $\lambda_A = \lambda_B = 150 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; 4 – $\lambda_A = \lambda_B = 200 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$

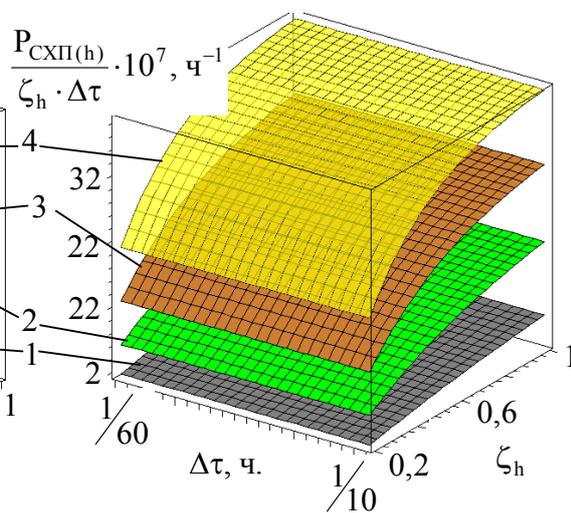


Рисунок 4 – Относительная зависимость вероятности возникновения ПВО ситуации на протяжении одного года в интервале времени 1 час от коэффициента нагрузки и времени $\Delta\tau$:
 1 – $\lambda_A = \lambda_B = 50 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; 2 – $\lambda_A = \lambda_B = 100 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; 3 – $\lambda_A = \lambda_B = 150 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; 4 – $\lambda_A = \lambda_B = 200 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$

Анализ рисунков показывает, что величина $P_{СХП(h)}$ прямопропорциональна значению $\Delta\tau$.

С целью определения влияния распределения ζ_h на протяжении суток на рис. 5 приведены зависимости $P_{СХП(h)}, P_{СХП}$ при различных законах изменения ζ_h :

$$\zeta_{h_1} = 0,5 + 0,5 \sin\left(\frac{\pi \cdot h}{24}\right), \quad (29)$$

$$\zeta_{h_2} = \begin{cases} 0,5; & h \in [1; 7] \cup [19; 24]; \\ 1; & h \in [8; 18]. \end{cases} \quad (30)$$

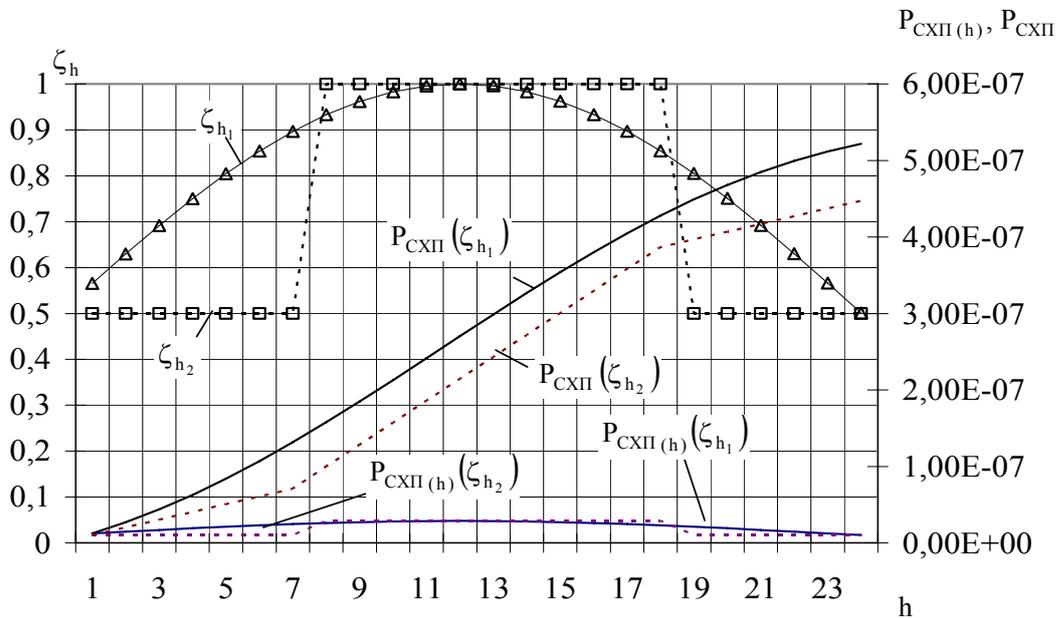


Рисунок 5 – Зависимость вероятности возникновения ПВО ситуации от коэффициента нагрузки: $\lambda_A = \lambda_B = 100 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; $\Delta\tau = 1/60 \text{ ч}$

Из рис. 5 следует, что работа системы по законам (29) и (30) приводит к тому, что разница вероятностей возникновения ПВО ситуации по истечению одного года не превышает 15%. На рис. 6 приведены относительные разницы δ_ζ и δ_P .

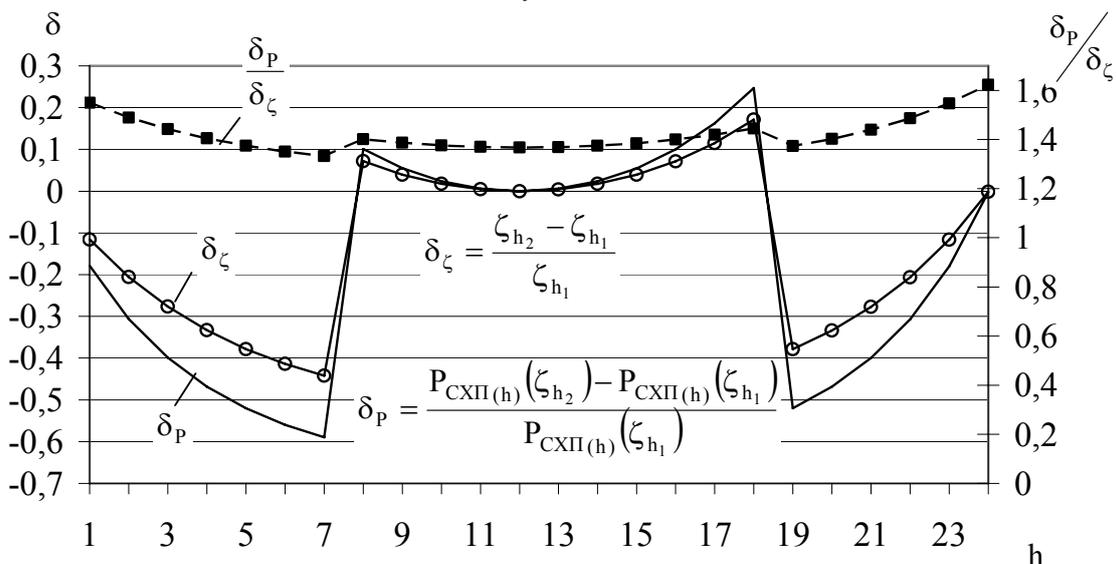


Рисунок 6 – Зависимость относительных разниц δ_ζ и δ_P от h ($D=365$)

Анализ рис. 6 показывает, что, несмотря на принципиально разный характер изменения ζ_{h_1} и ζ_{h_2} , относительные разницы δ_ζ и δ_p имеют похожий характер изменения на протяжении суток. При этом следует отметить, что $\delta_p / \delta_\zeta \approx 1,5$.

Выводы. В результате проведенной работы получено упрощенное выражение для оценки уровня ПВО СХП водорода, учитывающее нагрузку на элементы системы, при этом показано, что имеет место прямопропорциональная зависимость вероятности возникновения ПВО ситуации от времени между возникновением и ликвидацией источника зажигания (горючей среды) и инвариантность вероятности возникновения ПВО ситуации к значению h – часа суток.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Корниенко Р.В. Оценка пожаровзрывоопасности систем хранения и подачи водорода на основе гидрореагирующих составов и разработка рекомендаций по ее снижению. Дис. к. т. н. 21.06.02. – Харьков, 2004. – 160 с.

3. Ключка Ю.П. Оценка вероятности возникновения аварийной ситуации в системе хранения и подачи водорода // Проблемы надзвичайних ситуацій. Зб. наук. пр. УЦЗ України. Вип. 8. – Харків: УЦЗУ, 2008.- С. 92-102.

4. Ключка Ю.П. Определение уровня ПВО СХП водорода от ее характеристик и системы пожарной автоматики // Науковий вісник будівництва. Збірник наукових праць. – Харків: ХДТУБА, 2009. – Вип. 51. – С. 347-351.

nuczu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 18.03.2009 г.