

УДК 614.8

*Кривцова В.И., д-р техн. наук, проректор, УГЗУ,  
Ключка Ю.П., канд. техн. наук, науч. сотр., УГЗУ,  
Грушко А.И., ад'юнкт, УГЗУ*

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ В СИСТЕМЕ ХРАНЕНИЯ И ПОДАЧИ ВОДОРОДА

Получены зависимости для оценки вероятности возникновения аварийной ситуации в системе хранения и подачи водорода. Показано, что по истечении некоторого времени более опасная система на начальном этапе эксплуатации может оказаться менее опасной.

**Постановка проблемы.** Одним из сдерживающих факторов широкого использования систем хранения и подачи водорода (СХП) является высокий уровень пожаровзрывоопасности (ПВО) водорода и систем, в которых он хранится [1-4]. При этом существуют сложности при оценке вероятности возникновения ПВО ситуации в этих системах [2].

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работах [2-3, 5] было показано, что вероятность возникновения ПВО ситуации в СХП определяется в соответствии со следующим выражением

$$P_{СХП}(t) = P_{А_{СХП}}(t) \cdot P_{В_{СХП}}(t), \quad (1)$$

где  $P_{А_{СХП}}(t)$  и  $P_{В_{СХП}}(t)$  – вероятность образования горючей среды и появления источников зажигания в элементах СХП соответственно.

При этом вероятности  $P_{А_{СХП}}(t)$  и  $P_{В_{СХП}}(t)$  можно определять как вероятности отказа технических устройств [2, 5]. В случае экспоненциального закона распределения потока отказов выражение (1) можно переписать следующим образом

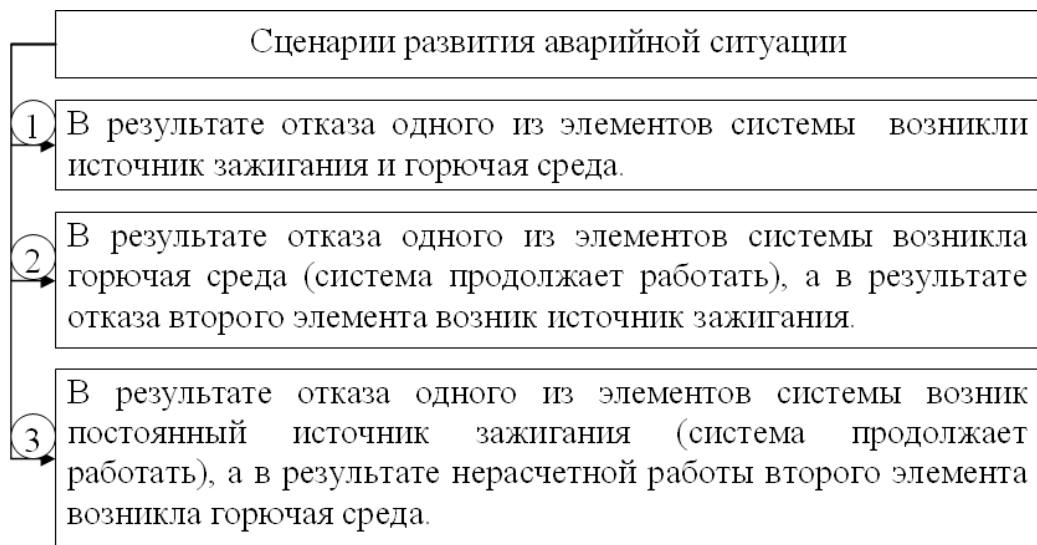
$$P_{СХП}(t) = \left( 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_{A(n)} t_n\right) \right) \left( 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_{B(n)} t_n\right) \right), \quad (2)$$

где  $\lambda_{A(n)}$  и  $\lambda_{B(n)}$  – интенсивность отказов соответствующих технических устройств;  $t_n$  – время непрерывной работы соответствующих технических устройств.

При этом необходимо учитывать, что возникновение аварийной ситуации возможно как в результате отказа одного элемента, поломка которого может привести к возникновению горючей среды и источника зажигания, так и в результате отказа двух элементов, поломка каждого из которых приводит к одному из событий. Также следует учитывать, что вероятность возникновения аварийной ситуации напрямую зависит от автоматических средств защиты или оператора, т.е. от времени реакции на то или иное событие.

**Постановка задачи и ее решение.** В связи с этим необходимо рассмотреть сценарии развития аварийной ситуации, а также определить вероятности возникновения ПВО ситуации в зависимости от параметров системы, систем автоматики и т.д.

На рис. 1 приведены возможные сценарии развития аварийной ситуации.



**Рис. 1 – Сценарии развития аварийной ситуации**

На рис. 2 приведена иллюстрация сценария №1 (рис. 1).

Поскольку в данном случае возникновение ПВО ситуации характеризуется отказом одного элемента, то вероятность ПВО ситуации будет определяться выражением

$$P_{(CXII)}(t) = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_{C(i)} t_i\right), \quad (3)$$

где  $\lambda_{C(i)}$  – интенсивность отказов соответствующих элементов, которые могут привести к возникновению ПВО ситуации (к возникновению горючей среды и источника зажигания одновременно);  $n$  – количество элементов, которые могут привести к возникновению ПВО ситуации.



Рис. 2 – Иллюстрация ситуации при наличии опасных факторов

В случае если  $t_i = \text{const}$ , выражение (3) можно записать в следующем виде

$$P_{(CXII)}(t) = 1 - e^{(-\lambda_C \cdot t)}, \quad (4)$$

где  $\lambda_C = \sum_{i=1}^n \lambda_{C(i)}$ .

С целью определения влияния параметров  $t$  и  $\lambda_C$  на скорость изменения  $P_{(CXII)}(t)$  найдем частные производные  $P_{(CXII)}(t)$  по  $t$  и  $\lambda_C$

$$\frac{\partial P_{CXII}(t)}{\partial t} = \lambda_C e^{(-\lambda_C \cdot t)}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial P_{CXII}(t)}{\partial \lambda_C} = t e^{(-\lambda_C \cdot t)}. \quad (6)$$

На рис. 3 и 4 приведено графическое отображение выражений (5) и (6).

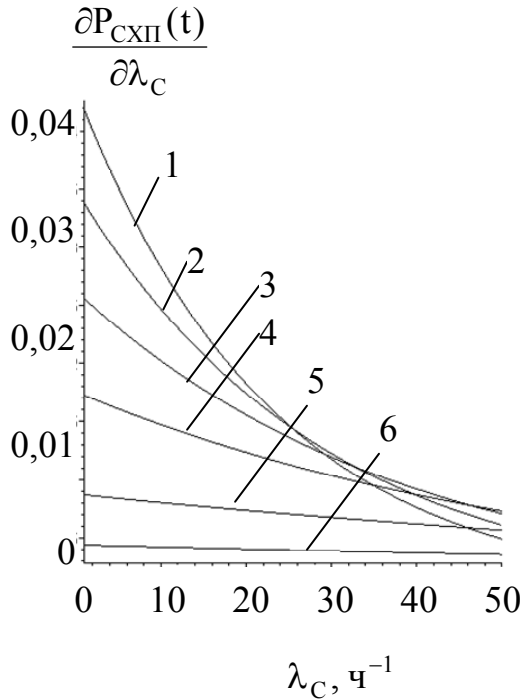


Рис. 3 – Зависимость

$\frac{\partial P_{СХП}(t)}{\partial \lambda_C}$  в зависимости от  $t$  и  $\lambda_C$ :  
 1 –  $t=5$  год; 2 –  $t=4$  год; 3 –  $t=3$  год;  
 4 – 2 год; 5 –  $t=1$  год; 6 –  $t=0,5$  год

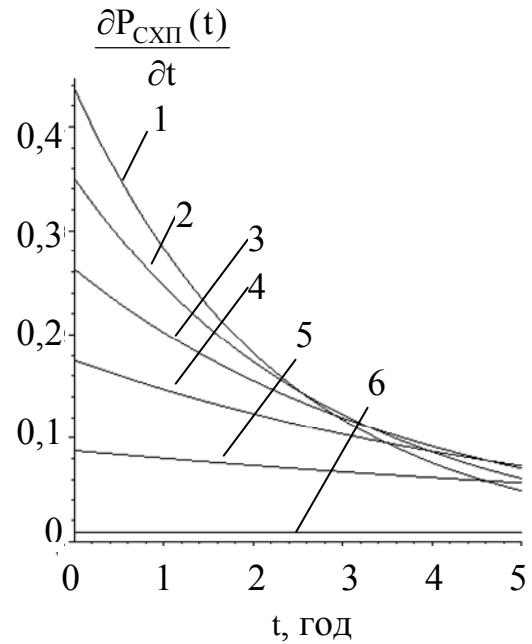


Рис. 4 – Зависимость

$\frac{\partial P_{СХП}(t)}{\partial t}$  в зависимости от  $t$  и  $\lambda_C$ :  
 1 –  $\lambda_C=50 \cdot 10^{-6}$  ч<sup>-1</sup>; 2 –  $\lambda_C=40 \cdot 10^{-6}$  ч<sup>-1</sup>;  
 3 –  $\lambda_C=30 \cdot 10^{-6}$  ч<sup>-1</sup>; 4 –  $\lambda_C=20 \cdot 10^{-6}$  ч<sup>-1</sup>;  
 5 –  $\lambda_C=10 \cdot 10^{-6}$  ч<sup>-1</sup>; 6 –  $\lambda_C=1 \cdot 10^{-6}$  ч<sup>-1</sup>

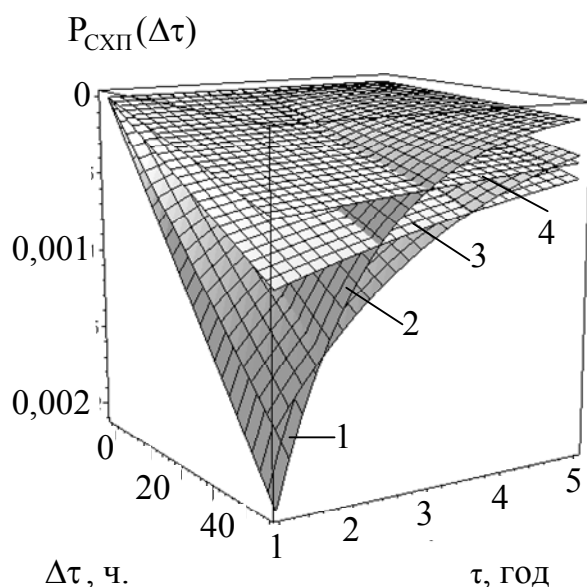
Из рисунков следует, что с увеличением  $t$  и  $\lambda_C$  скорость увеличения  $P_{(СХП)}(t)$  уменьшается.

Для того чтобы более наглядно увидеть влияние скоростей на изменение вероятности возникновения ПВО ситуации, а также для ее оценки на некотором отрезке времени  $\Delta\tau$  воспользуемся выражением (5), которое проинтегрируем в интервале от  $(\tau + \Delta\tau)$  до  $(\tau)$

$$P_{СХП}(\Delta\tau) = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \lambda e^{(-\lambda_C \cdot t)} dt = -e^{(-\lambda_C \cdot t)} \Big|_{\tau}^{\tau+\Delta\tau}, \quad (7)$$

$$P_{СХП}(\Delta\tau) = e^{(-\lambda_C \cdot \tau)} (1 - e^{(-\lambda_C \cdot \Delta\tau)}) \approx e^{(-\lambda_C \cdot \tau)} \lambda_C \Delta\tau. \quad (8)$$

На рис. 5 приведенные графические зависимости  $P_{СХП}(\Delta\tau)$  в зависимости от  $\tau$  и  $\Delta\tau$  при различных значениях  $\lambda_C$ .



**Рис. 5 – Зависимость вероятности возникновения ПВО ситуации в зависимости от  $\tau$  и  $\Delta\tau$ : 1 –  $\lambda_C = 100 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ ; 2 –  $\lambda_C = 50 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ ; 3 –  $\lambda_C = 20 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ ; 4 –  $\lambda_C = 10 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$**

Из рисунка следует, что при малых значениях  $\tau$  вероятность возникновения ПВО ситуации на интервале  $\Delta\tau$  увеличивается с увеличением  $\lambda_C$ . Но с ростом величины  $\tau$  ситуация противоположная – вероятность возникновения ПВО ситуации на интервале  $\Delta\tau$  увеличивается с уменьшением  $\lambda_C$ .

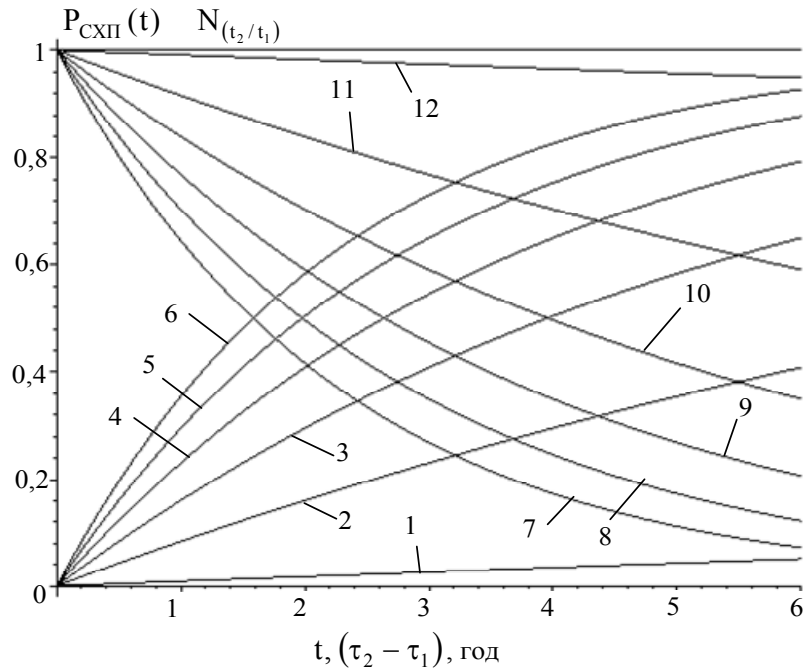
Таким образом, из рисунка следует, что при эксплуатации систем, которые отличаются лишь значениями  $\lambda_C$ , в начале эксплуатации более опасными будут системы с высокими значениями  $\lambda_C$ , но с течением времени ситуация изменится, и более опасными будут системы с низкими значениями  $\lambda_C$ .

Оценку изменения вероятности возникновения ПВО ситуации на интервале  $\Delta\tau$  можно определить в соответствии со следующим выражением (из выр. (8))

$$N_{(\tau_2/\tau_1)} = \frac{P_{СХП}(\Delta\tau)_{\tau_2}}{P_{СХП}(\Delta\tau)_{\tau_1}} = \frac{e^{(-\lambda_C \cdot \tau_2)}(1 - e^{(-\lambda_C \cdot \Delta\tau)})}{e^{(-\lambda_C \cdot \tau_1)}(1 - e^{(-\lambda_C \cdot \Delta\tau)})} = e^{-\lambda_C(\tau_2 - \tau_1)}, \quad (9)$$

где  $P_{СХП}(\Delta\tau)_{\tau_2}$  – вероятность возникновения ПВО ситуации по истечению времени  $\tau_2$  на интервале  $\Delta\tau$ ;  $P_{СХП}(\Delta\tau)_{\tau_1}$  – вероятность возникновения ПВО ситуации по истечению времени  $\tau_1$  на интервале  $\Delta\tau$ .

На рис. 6 в соответствии с выр. (4) приведены зависимости  $P_{СХП}(t)$  от времени при различных значениях  $\lambda_C$  и в соответствии с выр. (9) зависимости соотношений  $N_{(\tau_2/\tau_1)}$ .



**Рис. 6 – Вероятность возникновения ПВО ситуации и зависимость (9): 1-6 –  $P_{СХП}(t)$ ; 7-12 –  $N_{(\tau_2/\tau_1)}$ ; 1, 12 –  $\lambda_C=1 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ ; 2, 11 –  $\lambda_C=10 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ ; 3, 10 –  $\lambda_C=20 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ ; 4, 9 –  $\lambda_C=30 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ ; 5, 8 –  $\lambda_C=40 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ ; 6, 7 –  $\lambda_C=50 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$**

Из рисунка следует, что с ростом  $\lambda_C$  и  $(\tau_2 - \tau_1)$  значение  $N_{(\tau_2/\tau_1)}$  уменьшается, т.е. вероятность возникновения аварийной ситуации в СХП водорода на одинаковых промежутках времени во время  $\tau_2$  и  $\tau_1$  ( $\tau_2 > \tau_1$ ) уменьшается.

Другими вариантами развития аварийной ситуации являются сценарии 2 и 3 (рис. 1), которые представлены на рис. 7а и 7б.

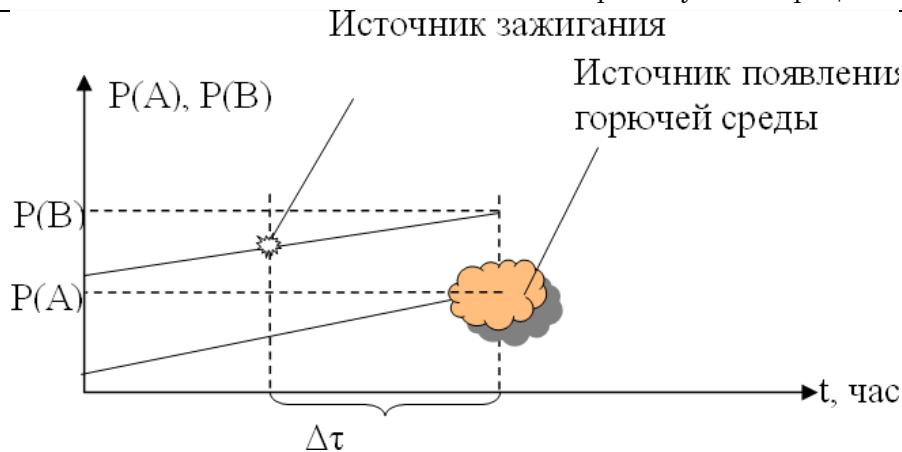


Рис. 7а – Развитие аварийной ситуации по сценарию № 2

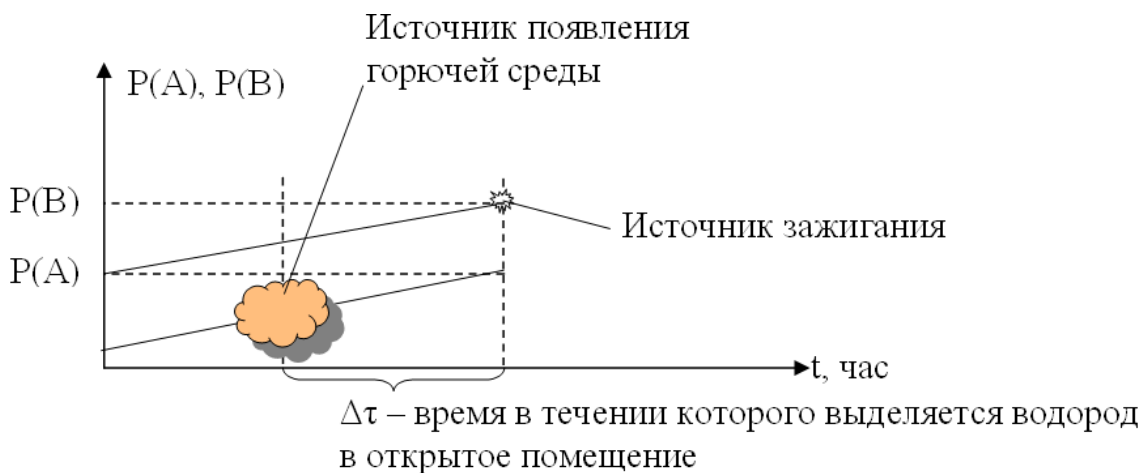


Рис. 7б – Развитие аварийной ситуации по сценарию № 3

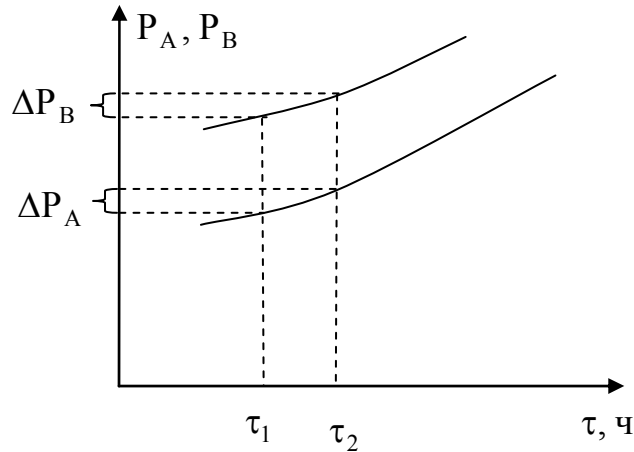
Из рис. 7а и 7б следует, что ключевым моментом в таких сценариях развития аварийной ситуации является время  $\Delta t$ , в течение которого происходит два события – возникновение горючей среды и источника зажигания. На рис. 8 схематически показаны кривые вероятности возникновения источника зажигания и горючей среды в системе, а также способ определения  $\Delta P_A$  и  $\Delta P_B$ .

Тогда из (1), с учетом рис. 8, вероятность возникновения ПВО ситуации на интервале  $\Delta t$  будет равна произведению вероятностей возникновения горючей среды и источника зажигания на данном интервале

$$\Delta P_{СХП}(\Delta t) = \Delta P_A \cdot \Delta P_B. \quad (10)$$

Учитывая то, что  $\frac{\partial P_A(t)}{\partial t} = \lambda_A e^{(-\lambda_A \cdot t)}$  и  $\frac{\partial P_B(t)}{\partial t} = \lambda_B e^{(-\lambda_B \cdot t)}$ , то выражение (10) можно записать как

$$P_{СХП}(\Delta\tau) = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (\lambda_A e^{(-\lambda_A \cdot t)}) dt \cdot \int_{\tau_1}^{\tau_2} (\lambda_B e^{(-\lambda_B \cdot t)}) dt. \quad (11)$$



**Рис. 8 – Вероятности возникновения ПВО ситуации на интервале  $\Delta\tau$**

При этом следует отметить, что для определения  $P_{СХП}$  на искомом интервале времени  $T$  необходимо просуммировать вероятности возникновения ПВО ситуации на всех интервалах времени  $\Delta\tau$  (для случая, когда события на интервалах  $\Delta\tau$  не связаны между собой), т.е.

$$P_{СХП} = \sum_{n=1}^N P_{СХП_n}(\Delta\tau), \quad (12)$$

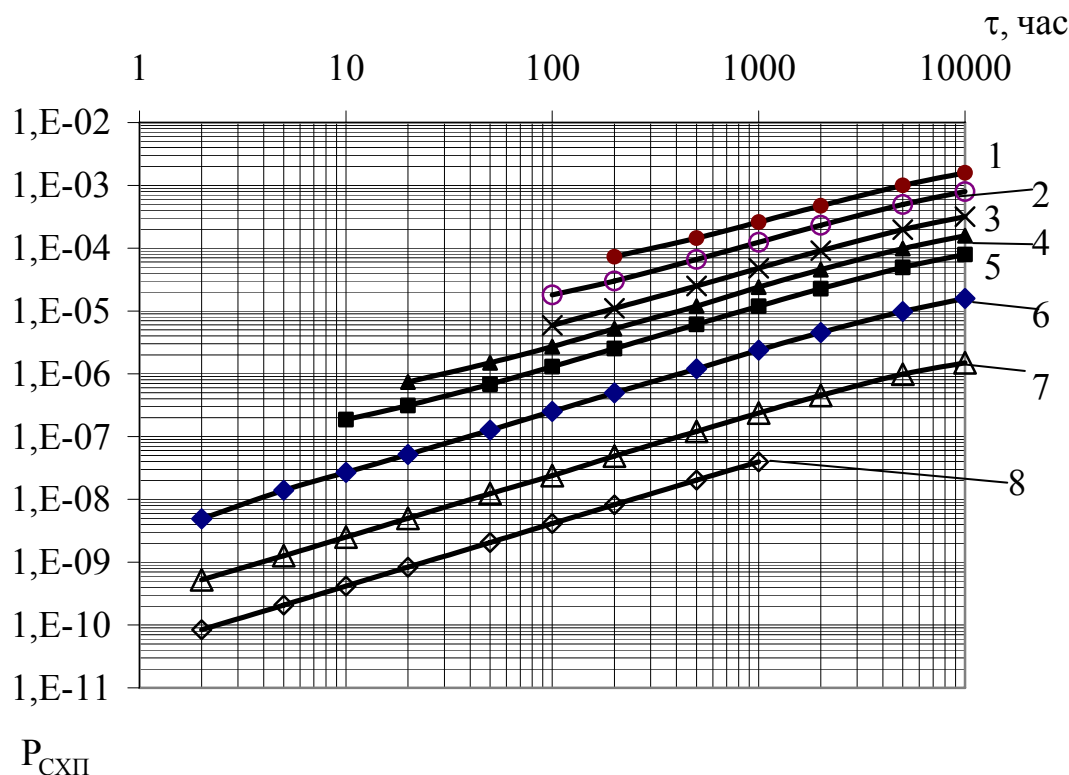
где  $N$  – количество интервалов  $\Delta\tau$ ,  $T = N \cdot \Delta\tau$ .

При этом  $n$  можно интерпретировать не только как номер интервала, но и как время начала интервала, т.е.  $\tau_1$  в соответствии с рис. 8. В этом случае выражение (12) примет следующий вид



$$P_{СХП} = \sum_{n=1}^N \left[ \int_{(n-1)\Delta\tau}^{n\Delta\tau} (\lambda_A e^{-\lambda_A \cdot t}) dt \cdot \int_{(n-1)\Delta\tau}^{n\Delta\tau} (\lambda_B e^{-\lambda_B \cdot t}) dt \right]. \quad (13)$$

На рис. 9 в соответствии с выр. (13) приведены зависимости  $P_{СХП}$  от времени при различных значениях  $\Delta\tau$ . Все кривые на рис. 9 построены для случая, когда  $\lambda_A = \lambda_B = 50 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ .



**Рис. 9 – Вероятность возникновения ПВО ситуации в зависимости от времени при различных значениях  $x$ : 1 –  $\Delta\tau=100$  ч.; 2 –  $\Delta\tau=50$  ч.; 3 –  $\Delta\tau=20$  ч.; 4 –  $\Delta\tau=10$  ч.; 5 –  $\Delta\tau=5$  ч.; 6 –  $\Delta\tau=1$  ч.; 7 –  $\Delta\tau=0,1$  ч. (6 мин.); 8 –  $\Delta\tau=1/60$  ч. (1 мин.)**

Из рисунка следует, что значительное влияние на уровень  $P_{СХП}$  имеет значение переменной  $\Delta\tau$  (при уменьшении  $\Delta\tau$  со 100 до 0,1 значение  $P_{СХП}$  уменьшается на 3 порядка), которая на практике является временем обнаружения и ликвидации источника зажигания или горючей среды.

Для оценки влияния значений  $\lambda_A$  и  $\lambda_B$  на  $P_{СХП}$  на рис. 10 представлены зависимости  $P_{СХП}$  при различных значениях интен-

сивности отказов. Все кривые на рис. 10 построены для случая, когда  $\lambda_A = \lambda_B$  и  $\Delta\tau=0,1$  ч.

Из рисунка следует, что увеличение значений  $\lambda_A$  и  $\lambda_B$  на порядок влечет за собой увеличение значения  $P_{СХП}$  на два порядка.

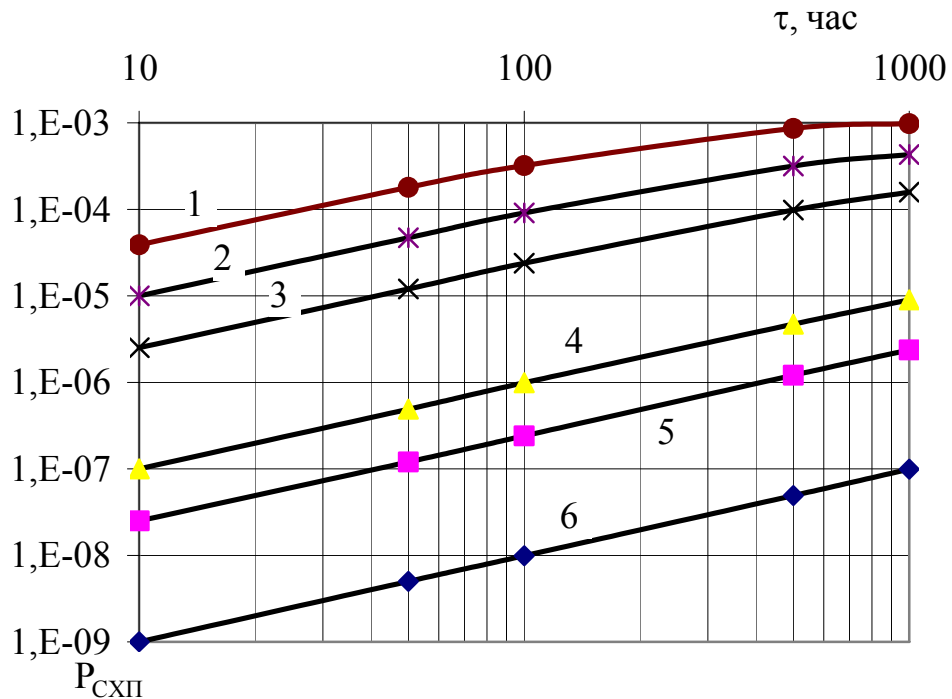


Рис. 10 – Вероятность возникновения ПВО ситуации в зависимости от времени при различных значения  $\lambda$ : 1 –  $\lambda=2000 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ ; 2 –  $\lambda=1000 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ ; 3 –  $\lambda=500 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ ; 4 –  $\lambda=100 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ ; 5 –  $\lambda=50 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ ; 6 –  $\lambda=10 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$

#### Выводы. В работе:

- рассмотрены три сценария возникновения аварийной ситуации;
- получены выражения, позволяющие определить вероятность возникновения аварийной ситуации на некотором участке времени;
- показано что по истечении некоторого времени более опасная система на начальном этапе эксплуатации может оказаться менее опасной;
- рассмотрено влияние параметров  $t$  и  $\lambda_C$  на скорость изменения  $P_{(СХП)}(t)$ ;

– получена зависимость для определения изменения вероятности возникновения аварийной ситуации на интервале  $\Delta t$  в течение эксплуатации системы;

– получена зависимость для оценки вероятности возникновения аварийной ситуации на интервале  $\Delta \tau$  и в течении времени  $T$  при различных значениях  $\lambda_A$  и  $\lambda_B$  и  $\Delta \tau$ ;

– показано влияние параметров  $\lambda_A$  и  $\lambda_B$  и  $\Delta \tau$  на значение вероятности возникновения аварийной ситуации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортировка, применение: Справочное издание / Д.Ю. Гамбург, В.П. Семенов, Н.Ф. Дубовнин и др.: под ред. Д.Ю. Гамбурга, И.Ф. Дубовнина, - М.:Химия, 1989. – 672с.
2. 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.
3. Абрамов Ю.А., Кривцова В.И., Ключка Ю.П. Анализ пожаровзрывобезопасности систем хранения и подачи водорода на основе обратимых гидридов интерметаллидов // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. АГЗ Украины. – Вып. 17. – Харьков: Фолио, 2005. – С.66 – 74.
4. Абрамов Ю.А., Кривцова В.И., Левтеров А.А., Ключка Ю.П. Комплексная оценка пожаровзрывоопасных свойств систем хранения и подачи водорода на основе обратимых гидридов интерметаллидов // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. АГЗ Украины. – Вып. 18. – Харьков: Фолио, 2005. – С.9 – 14.
5. 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.  
nuczu.edu.ua