

## УДК 614.8

*А. А. Михайлюк, к.т.н., с.н.с., нач. адъюнктуры, докторантуры, НУГЗУ,  
Ю. А. Абрамов, д.т.н., профессор, главн. н.с., НУГЗУ,  
В. И. Кривцова, д.т.н., профессор, проф. каф., НУГЗУ*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УРОВНЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ И ПОДАЧИ ВОДОРОДА

Построена математическая модель, которая обеспечивает получение оценок уровня пожарной опасности систем хранения и подачи водорода на этапе их синтеза.

**Ключевые слова:** система хранения и подачи водорода, уровень пожарной опасности, вероятность возникновения пожара.

**Постановка проблемы.** Водород является одним из высококалорийных топлив, потребление которого, в силу уникальных теплофизических свойств, неуклонно растет. Использование водорода, а соответственно и его систем хранения и подачи, обычно связывают с повышенной пожароопасностью. Это обстоятельство обуславливает необходимость в определении уровня пожарной опасности систем хранения и подачи водорода. Одной из проблем при этом является получение априорных оценок уровня пожарной опасности таких систем.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В [1] для оценки уровня пожарной опасности оборудования используется величина энергии зажигания. Величина этого параметра имеет достаточно большой разброс, вследствие чего уровень пожарной опасности определяется достаточно грубо. Для определения вероятности возникновения пожара в [2] используются нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения горючей смеси, а также величина энергии зажигания. Однако такой подход позволяет лишь ранжировать соответствующие технические устройства.

Рассмотренные недостатки при определении уровня пожарной опасности, в частности СХП водорода, обуславливают необходимость в создании более совершенной математической модели, обеспечивающей получение оценок уровня пожарной опасности.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является построение математической модели, которая описывает уровень пожарной опасности системы хранения и подачи (СХП) водорода, содержащей газогенератор.

Уровень пожарной опасности СХП водорода определяется вероятностью возникновения пожара

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{ci}(t)), \quad (1)$$

где  $P_{ci}(t)$  – вероятность возникновения пожара в  $i$ -м элементе СХП

водорода.

Для  $P_{ci}(t)$  имеет место [3].

$$P_{ci}(t) = P_{Ai}(t)P_{Bi}(t), \quad (2)$$

где  $P_{Ai}(t)$  – вероятность образования горючей среды;  $P_{Bi}(t)$  – вероятность появления источника зажигания.

Вероятность, где  $P_{Ai}(t)$  определяется выражением

$$P_{Ai}(t) = P_{A1i}(t)P_{A2i}(t) = \left[ 1 - \prod_{j=1}^R (1 - P_{A1ij}(t)) \right] \left[ 1 - \prod_{\mu=1}^R (1 - P_{A2i\mu}(t)) \right], \quad (3)$$

где  $P_{A1i}(t)$  и  $P_{A2i}(t)$  – вероятность появления событий  $A1$  и  $A2$  соответственно;  $P_{A1ij}(t)$  и  $P_{A2i\mu}(t)$  – вероятность появления событий  $A1_j$  и  $A1_\mu$  соответственно.

Событием  $A1$  является появление достаточного для образования горючей среды количества вещества в течение рассматриваемого интервала времени. Событием  $A2$  является появление достаточного для образования горючей среды окислителя на рассматриваемом интервале времени.

К событиям  $A1_j$  относятся:

- постоянное присутствие в элементе СХП водорода горючего вещества;
- разгерметизация устройств или коммуникаций с горючим веществом;
- образование горючего вещества вследствие химической реакции;
- снижение концентрации флегматизатора в горючем газе ниже минимально допустимой;
- нарушение технологии очистки элемента СХП водорода горючих отходов.

К событиям  $A2_\mu$  относятся:

- концентрация окислителя, поступающего в горючую смесь, больше допустимого уровня;
- подсос окислителя в один из элементов СХП водорода;
- постоянное присутствие окислителя в элементе системы.

Для вероятности  $P_{Bi}(t)$  можно записать

$$P_{Bi}(t) = 1 - \prod_{n=1}^G (1 - P_{Bin}(t)), \quad (4)$$

где

$$P_{Bin}(t) = 1 - \prod_{m=1}^W (1 - P_{Binm}(t)), \quad (5)$$

В этих выражениях  $P_{Bin}(t)$  – вероятность появления событий  $B_n$ ;

$P_{Binm}(t)$  – вероятность появления событий  $B_{nm}$ . К числу событий  $B_n$  относятся:

- появление электрической искры или электрической дуги;
- появление фрикционных искр;
- появление открытого пламени.

К событиям  $B_{nm}$  относятся:

- появление искр короткого замыкания в электрических коммуникациях элемента СХП водорода;
- возникновение в элементе СХП водорода разрядов статического электричества;
- разрушение подвижных деталей;
- попадание посторонних объектов в подвижные механизмы элемента СХП водорода;
- выброс нагретого газа;
- неисправность дуго-искрогасительного устройства;
- увеличение момента нагрузки на валу электродвигателя;
- пропадание электропитания;
- обрыв электрической цепи заземления;
- появление в СХП водорода очага теплового самовозгорания;
- появление в СХП водорода очага химического возгорания.

После объединений (4) и (5) будет иметь место

$$P_{Bi}(t) = 1 - \prod_{n=1}^G \prod_{m=1}^W (1 - P_{Binm}(t)), \quad (6)$$

Тогда для вероятности  $P_c(t)$  с учетом (3) и (4) получим выражение

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^N \left[ 1 - \left[ 1 - \prod_{j=1}^R (1 - P_{A1ij}(t)) \right] \times \left[ 1 - \prod_{\mu=1}^M (1 - P_{A2i\mu}(t)) \right] \left[ 1 - \prod_{n=1}^G \prod_{m=1}^W (1 - P_{Binm}(t)) \right] \right], \quad (7)$$

Следует заметить, что выражение (7) предполагает использование статистических данных для определения элементов такой модели. Одним из вариантов такого подхода может быть использование коэффициентов безопасности [4].

На этапе синтеза СХП водорода могут возникать трудности с использованием модели (7), что обусловлено отсутствием статистических данных. Одним из путей разрешения таких трудностей может быть использование в качестве составляющих  $P_{A1ij}(t)$ ,  $P_{A2i\mu}(t)$ ,  $P_{Binm}(t)$  вероятностей отказа элементов СХП водорода, обеспечивающих невозможность появления событий  $A1_{ij}$ ,  $A2_{i\mu}$  и  $B_{inm}$  соответственно. Тогда модель (7) может быть трансформирована к виду

$$\begin{aligned}
P_c(t) &= 1 - \prod_{i=1}^N \left[ 1 - \left[ 1 - \prod_{j=1}^R (1 - Q_{A1ij}(t)) \right] \left[ 1 - \prod_{\mu=1}^M Q_{A2i\mu}(t) \right] \times \right. \\
&\quad \left. \times \left[ 1 - \prod_{n=1}^G \prod_{m=1}^W Q_{Binm}(t) \right] \right] = \\
&= 1 - \left[ 1 - \exp \left( - \sum_{j=1}^R \lambda_{A1ij} t_j \right) \right] \left[ 1 - \exp \left( - \sum_{\mu=1}^M \lambda_{A2i\mu} t_\mu \right) \right] \times \\
&\quad \times \left[ 1 - \exp \left( - \sum_{n=1}^G \sum_{m=1}^W \lambda_{Binm} t_m \right) \right],
\end{aligned} \tag{8}$$

где  $Q_{A1ij}(t)$ ,  $Q_{A2i\mu}(t)$ , и  $Q_{Binm}(t)$  – вероятность безотказной работы устройств обеспечивающих невозможность появления событий  $A1_{ij}$ ,  $A2_{i\mu}$  и  $B_{inm}$  соответственно;  $\lambda_{A1ij}$ ,  $\lambda_{A2i\mu}$  и  $\lambda_{Binm}$  – интенсивность отказов соответствующих устройств;  $t_j$ ,  $t_\mu$ ,  $t_m$  – время непрерывной работы соответствующих устройств.

Если учесть, что интенсивность отказов соответствующих устройств СХП водорода не превышает  $10^{-5} \text{ час}^{-1}$ , а время генерации водорода составляет порядка  $10^2 \text{ час}$ , то для  $t_j = t_\mu = t_m = t$  модель (8) трансформируется следующим образом

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^N \left[ 1 - \left( \sum_{j=1}^R \lambda_{A1ij} \right) \left( \sum_{\mu=1}^M \lambda_{A2i\mu} \right) \left( \sum_{n=1}^G \sum_{m=1}^W \lambda_{Binm} \right) t^3 \right]. \tag{9}$$

Если предположить, что  $N=R=M=G=N=10$ , что соответствует одной из «жестких» пожароопасных ситуаций функционирования СХП водорода, то из (9) следует, что вероятность возникновения пожара составляет порядка  $10^{-4}$  (при  $\lambda_{A1ij} = \lambda_{A2i\mu} = \lambda_{Binm} = 10^{-5} \text{ час}^{-1} \text{ ut} = 10^2 \text{ час}$ ).

**Выводы.** Для этапа, который соответствует синтезу СХП водорода, в предположении, что вероятности появления событий, обуславливающих возникновение пожара, эквивалентны вероятностям отказа устройств, обеспечивающих невозможность появления таких событий, построена математическая модель, обеспечивающая получение оценок пожароопасной ситуации в СХП водорода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Б. А. Безопасность применения материалов в контакте с кислородом / Б. А. Иванов. М.: Химия, 1984. 2732 с.
2. Баратов А. Н., Попов Б. Г., Писков Ю. К. Общая методика оценки уровня пожаровзрывоопасности оборудования, используемого в химической промышленности / В.: Пожарная профилактика: Информ. сб. М.: Стройиздат, 1977 № 4. С. 43–48.

3. Абрамов Ю. А., Росоха В. Е., Кривцова В. И. Алгоритм обеспечения требуемого уровня пожарной безопасности объектов / Проблемы пожарной безопасности X.: Фолио, 2000. Вып. 7. С. 3–6.

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

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

**Алгоритм контролю технічного стану газогенератора як складової профілактики його пожежної небезпеки**

Побудовано математичну модель, яка забезпечує отримання оцінок рівня пожежної небезпеки систем зберігання і подачі водню на етапі їх синтезу.

**Ключові слова:** система зберігання і подачі водню, рівень пожежної небезпеки, ймовірність виникнення пожежі.

A. Mikhayluk, Yu. Abramov, V. Krivtsova

**Mathematical model of the fire hazard level of hydrogen storage and supply systems**

A mathematical model has been built that provides estimates of the fire hazard level of hydrogen storage and supply systems at the stage of their synthesis.

**Keywords:** hydrogen storage and supply system, fire hazard level, fire probability.