

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; λ_{A1ij} , $\lambda_{A2i\mu}$ и λ_{Binm} – интенсивность отказов соответствующих устройств; t_j , t_μ , t_m – время непрерывной работы соответствующих устройств.

Если учесть, что интенсивность отказов соответствующих устройств СХП водорода не превышает 10^{-5} час^{-1} , а время генерации водорода составляет порядка 10^2 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 $N=R=M=G=W=10$, 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.