

УДК 614.835.3

DOI 10.48612/ntp/3kp9-h92n-hgn7

## МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

М. О. МЕХОНОШИНА<sup>1</sup>, Ю. Е. АКТЕРСКИЙ<sup>1</sup>, А. А. ТАРАНЦЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,  
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук  
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

E-mail: mehonoshina.08@mail.ru, akterskij.y@igps.ru, t\_\_54@mail.ru

В статье представлена динамическая модель оценки и прогнозирования уровня пожарной опасности производственных объектов хранения сжиженного водородного топлива, основанная на теории непрерывных цепей Маркова. Модель описывает объект как систему, изменяющуюся во времени через группу определенных состояний (низкий уровень пожарной опасности, средний уровень пожарной опасности, высокий уровень пожарной опасности, критический уровень пожарной опасности, пожар, тушение пожара, ремонтно-восстановительные работы). Важным элементом являются интенсивности переходов между этими состояниями, рассчитываемые на статистике отказов оборудования, экспериментальных данных значений НКПР, вероятности обнаружения утечек, температурного режима хранения сжиженного водорода. Модель позволяет количественно прогнозировать вероятность нахождения объекта в аварийном состоянии в любой момент времени, что является основой для разработки противоаварийных мер и оптимизации систем безопасности.

**Ключевые слова:** сжиженное водородное топливо, пожарная опасность, динамическая модель, оценка риска, прогнозирование, производственные объекты, безопасность

## MODEL FOR ASSESSING AND FORECASTING THE FIRE HAZARD LEVEL OF LNG STORAGE FACILITIES

M. O. MEKHONOSHINA<sup>1</sup>, Yu. E. AKTERSKIY<sup>1</sup>, A. A. TARANTSEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,  
Russian Federation, St. Petersburg

<sup>2</sup> N. S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences  
Russian Federation, St. Petersburg

E-mail: goryacheva.97@inbox.ru, akterskij.y@igps.ru, t\_\_54@mail.ru

The article presents a dynamic model for assessing and predicting the fire hazard level of production facilities for storing liquefied hydrogen fuel, based on the theory of continuous Markov chains. The model describes the facility as a system that changes over time through a group of specific states (low fire hazard level, medium fire hazard level, high fire hazard level, critical fire hazard level, fire, fire suppression, and repair and restoration work). An important element is the transition rates between these states, which are calculated based on equipment failure statistics, experimental data on the lower flammable limit, the probability of detecting leaks, and the temperature conditions for storing liquefied hydrogen. The model allows for the quantitative prediction of the probability of an object being in an emergency state at any given time, which is the basis for risk assessment.

**Key words:** liquefied hydrogen fuel, fire hazard, dynamic model, risk assessment, forecasting, production facilities, and safety

### Введение

В современном мире растет тенденция к декарбонизации, в связи с чем ископаемые энергетические ресурсы отходят на второй план, так как являются источниками наибольших выбросов углекислого и других парниковых газов в атмосферу. В этом контексте водород приобретает стратегическое значение как ключевой элемент чистой энергетики в будущем. Ведущими странами разработаны нормативные документы, отражающие переход от традиционных источников энергии к использованию водорода в качестве энергоносителя. Россия не отстает от этой тенденции и в 2020 году утвердила концепцию развития водородной энергетики в Российской Федерации, которая определяет цели по производству, внутреннему потреблению и экспорту водорода [1–3].

В настоящее время происходит активное внедрение и развитие водородной энергетики, а также расширение областей применения водородного топлива. Все эти процессы сопровождаются созданием сложной инфраструктуры, ключевым элементом которой является создание объектов для хранения водорода. Пожарная опасность водорода характеризуется его физическими свойствами такими как, широкие пределы распространения пламени (составляет от 4 % до 75 % взрывоопасной смеси с воздухом), низкая энергия воспламенения (составляет 0,02 мДж), высокая скорость распространения пламени (скорость горения в воздухе составляет 2,65 м/с), низкая температура самовоспламенения водорода в воздухе (составляет 500 °С), высокая теплопроводная

способность (при сгорании 1 кг водорода выделяется около 141 МДж/кг). Высокая проникающая способность, низкая плотность и высокая подвижность молекул, отсутствие видимого пламени при горении и хрупкость материалов при контакте с водородом создают высокий уровень пожарной опасности при его хранении. Последствия утечек водорода могут иметь катастрофический характер как для работников предприятий, так и для проживающих в селитебной зоне.

Так как водород – это легкий газ, способный образовывать взрывоопасные смеси с воздухом, он так же обладает очень высокой воспламеняемостью и способен воспламеняться при наличии малого источника тепла. При воспламенении водорода отсутствует видимое пламя и образуется высокая температура горения, а также увеличивается скорость протекания реакции, что вызывает сложности при тушении.

В данной работе будем рассматривать обеспечение пожарной безопасности хранения водорода в сжиженном состоянии.

Сжиженный водород на объектах хранится в специальных резервуарах, называемых криогенными контейнерами (рис. 1) [4]. В них сжиженный водород хранится в диапазоне температур от -252,77 °С до -259,19 °С. Такие резервуары никогда не заполняют полностью водородом, оставляя не менее 5 % свободного пространства. Это нужно для того, чтобы в дальнейшем не нарастало давление, которое способно привести к разгерметизации этого резервуара и дальнейшему истечению водорода.

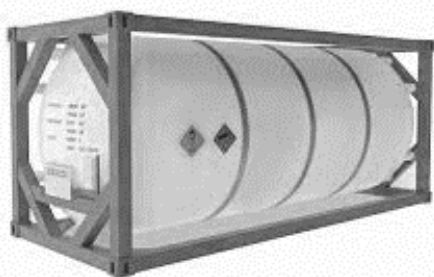


Рис. 1. Криогенные емкости для хранения сжиженного водорода

Для объектов хранения сжиженного водородного топлива предусмотрены следующие системы защиты:

- Предохранительные клапаны (обеспечивают сброс давления при его повышении);
- Система, обеспечивающая постоянный контроль хранения сжиженного водорода

(расходомеры, датчики давления, манометры, термометры, газоанализаторы);

- Системы установок пожаротушения;
- Системы вентиляции.

Время срабатывания систем защиты зависит от типа и конструкции, а также определяется паспортом на конкретное оборудование.

Существующие подходы к обеспечению пожарной безопасности объектов хранения сжиженного водородного топлива основываются на оценке пожарного риска, регламентированного для пожароопасных объектов, которые носят статичный и детерминированный характер, но не в полной мере учитывают динамическую природу развития аварии на объектах хранения сжиженного водородного топлива.

Так же написано множество работ [5–9] по хранению, транспортировке, нормативному регулированию, выявлению пожарной опасности водорода, но работ по снижению этой опасности нет.

Актуальность темы исследования обусловлена следующими факторами такими как:

- Растущий масштаб применения водорода;
- Особая пожарная опасность водорода;
- Недостаточно разработанные методы снижения пожарной опасности хранения сжиженного водорода.

Целью работы является разработка динамической модели оценки и прогнозирования уровня пожарной опасности производственных объектов хранения сжиженного водородного топлива, основанной на применении Марковского процесса.

### Материалы и методы исследования

Для достижения цели, поставленной в работе, применяется метод моделирования на основе непрерывных Марковских цепей, а также математическое моделирование с помощью метода Монте-Карло. Данный подход позволяет отразить вероятностный и динамический характер развития аварийных ситуаций на объектах хранения сжиженного водорода.

Процесс хранения сжиженного водородного топлива с возможным развитием событий представим в виде размеченного графа переходов системы из одного состояния в другое (рис. 2).

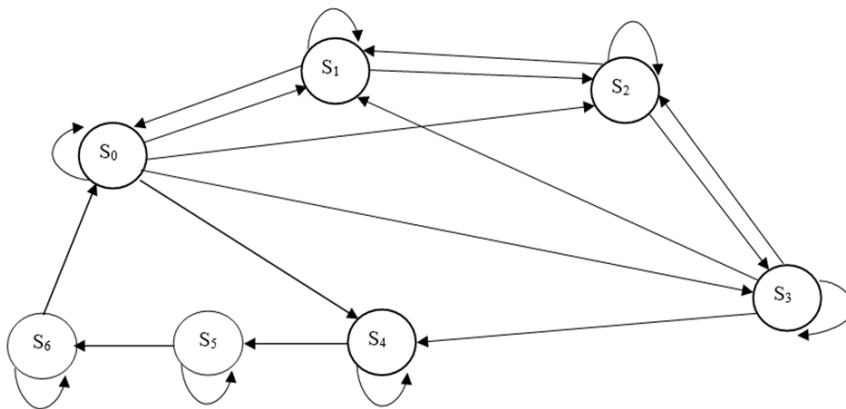


Рис. 2. Граф переходов системы из состояния в состояние

Поясним что, отсутствие прямого перехода  $S_2 \rightarrow S_4$  обусловлено наличием систем раннего обнаружения и предотвращения пожаров, а также постепенным накоплением факторов риска возникновения пожароопасной ситуации.

Также при достижении одного из критически важных параметров при хранении сжиженного водородного топлива вероятность перехода в состояние пожара резко возрастает. Дадим пояснение по каждому состоянию в табл. 1.

В качестве параметра, который количественно описывает скорость перехода из одного состояния в другое, выберем  $\{\lambda\}$  – интенсивность переходов. Интенсивности переходов рассчитываются на основе статистики отказов оборудования, экспериментальных данных скорости образования горючей смеси, технических характеристик систем защиты оборудования, вероятности обнаружения утечек, температурного режима хранения, давления в резервуарах.

Представим описание каждого перехода системы в табл. 2.

Таблица 1. Описание состояний переходов системы

Состояние	Наименование состояния	Описание состояния
S <sub>0</sub>	Низкий уровень ПО	Нормальные показатели температуры хранения водорода в сжиженном состоянии (от -252,77 °С до -259,19 °С); Концентрация водорода в воздухе ниже уровня НКПР; Отсутствие утечек водорода; Исправная работа систем контроля; Достижение любого критического показателя приводит систему в состояние S <sub>1</sub> .
S <sub>1</sub>	Средний уровень ПО	Температурные отклонения составляют до 2 °С; Концентрация водорода составляет 80–90 % от НКПР; Незначительные утечки водорода; Частичные сбои в работе систем контроля; Достижение любого критического показателя приводит систему в состояние S <sub>2</sub>
S <sub>2</sub>	Высокий уровень ПО	Температурные отклонения составляют 24°С; Концентрация водорода составляет 95-100 % от НКПР; Значительные утечки водорода; Сбои в работе систем контроля; Достижение любого критического показателя приводит систему в состояние S <sub>3</sub> .
S <sub>3</sub>	Критический уровень ПО	Температурные отклонения выше допустимой нормы; Концентрация водорода составляет выше НКПР; Критические утечки; Отказы в работе систем защиты; Достижение любого критического показателя приводит систему в состояние S <sub>4</sub> .
S <sub>4</sub>	Пожар	Стадия активного горения
S <sub>5</sub>	Тушение пожара	Процесс ликвидации горения
S <sub>6</sub>	Ремонтно-восстановительные работы	Восстановительные работы

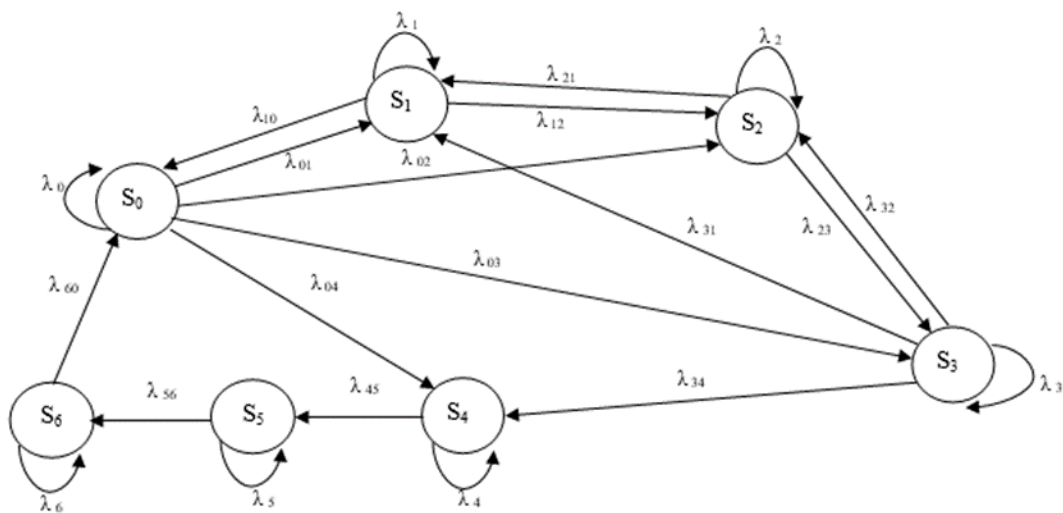


Рис. 3. Интенсивности переходов

Таблица 2. Описание переходов системы

λ перехода	Описание перехода
λ <sub>0</sub>	Состояние системы не изменилось. Система находится в состоянии «Низкий уровень ПО»
λ <sub>01</sub>	Система перешла в состояние «Средний уровень ПО»
λ <sub>10</sub>	Система вернулась в предыдущее в состоянии «Низкий уровень ПО»
λ <sub>02</sub>	Система перешла в состояние «Высокий уровень ПО»
λ <sub>03</sub>	Система перешла в состояние «Критический уровень ПО»
λ <sub>04</sub>	Система перешла в состояние «Пожар»
λ <sub>1</sub>	Состояние системы не изменилось. Система находится в состоянии «Средний уровень ПО»
λ <sub>12</sub>	Система перешла в состояние «Высокий уровень ПО»
λ <sub>21</sub>	Система вернулась в предыдущее в состоянии «Средний уровень ПО»
λ <sub>2</sub>	Состояние системы не изменилось. Система находится в состоянии «Высокий уровень ПО»
λ <sub>23</sub>	Система перешла в состояние «Критический уровень ПО»
λ <sub>32</sub>	Система вернулась в предыдущее в состоянии «Высокий уровень ПО»
λ <sub>3</sub>	Состояние системы не изменилось. Система находится в состоянии «Критический уровень ПО»
λ <sub>31</sub>	Система вернулась в состояние «Средний уровень ПО»
λ <sub>34</sub>	Система перешла в состояние «Пожар»
λ <sub>4</sub>	Состояние системы не изменилось. Система находится в состоянии «Пожар»
λ <sub>45</sub>	Система перешла в состояние «Тушение пожара»
λ <sub>5</sub>	Состояние системы не изменилось. Система находится в состоянии «Тушение пожара»
λ <sub>56</sub>	Система перешла в состояние «Ремонтно-восстановительные работы»
λ <sub>6</sub>	Состояние системы не изменилось. Система находится в состоянии «Ремонтно-восстановительные работы»
λ <sub>60</sub>	Система перешла в состояние «Низкий уровень ПО»

Исходя из представленного графа запишем систему алгебраических уравнений.

Для установившегося режима работы, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} 0 = -(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03} + \lambda_{04})p_0 + \lambda_{10}p_1 + \lambda_{60}p_6; \\ 0 = \lambda_{01}p_0 - (\lambda_{10} + \lambda_{12})p_1 + \lambda_{21}p_2 + \lambda_{31}p_3; \\ 0 = \lambda_{02}p_0 + \lambda_{12}p_1 - (\lambda_{21} + \lambda_{23})p_2 + \lambda_{32}p_3; \\ 0 = \lambda_{03}p_0 + \lambda_{23}p_2 - (\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34})p_3; \\ 0 = \lambda_{04}p_0 + \lambda_{34}p_3 - \lambda_{45}p_4; \\ 0 = \lambda_{45}p_4 - \lambda_{56}p_5; \\ 0 = \lambda_{56}p_5 - \lambda_{60}p_6; \end{cases} \quad (1)$$

где {λ} – интенсивности переходов; {p} – вероятности состояний (причём  $\sum_{i=0}^6 p_i = 1$ ).

Решение системы уравнений (1) может быть получено в аналитическом виде:

$$\begin{cases} p_0 = (1 + \sum_{i=1}^6 K_i)^{-1}; \\ p_i = K_i p_0, \quad i = 1, \dots, 6, \end{cases} \quad (2)$$

где {K} – коэффициенты, зависящие от интенсивностей переходов {λ}.

Применительно к системе уравнений (1) после алгебраических преобразований получаем коэффициенты {K}:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03})(\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34}) - \lambda_{03}\lambda_{34} - \lambda_{02}\lambda_{31} - \lambda_{01}\lambda_{32}}{\lambda_{23}\lambda_{34}} \cdot \frac{\lambda_{21}\lambda_{32} + \lambda_{31}(\lambda_{21} + \lambda_{23})}{\lambda_{10}(\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34}) + \lambda_{12}\lambda_{31} + \lambda_{32}(\lambda_{10} + \lambda_{12})}; \\ K_2 = \frac{\lambda_{31}(\lambda_{02} + K_1\lambda_{12}) + \lambda_{32}[K_1(\lambda_{10} + \lambda_{12}) - \lambda_{01}]}{\lambda_{21}\lambda_{32} + \lambda_{31}(\lambda_{21} + \lambda_{23})}; \\ K_3 = \frac{\lambda_{03} + K_2\lambda_{23}}{\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34}}; \\ K_4 = \frac{\lambda_{04} + K_3\lambda_{34}}{\lambda_{45}}; \\ K_5 = \frac{\lambda_{45}}{\lambda_{56}} K_4; \\ K_6 = \frac{\lambda_{56}}{\lambda_{60}} K_5. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, с использованием выражений (2) и (3) становится возможным найти вероятности {p} состояний исследуемой системы и принять решение либо об успешности её функционирования, либо о необходимости уточнения интенсивностей переходов {λ} для обеспечения нахождения ключевых вероятностей состояний в допустимых диапазонах.

**Результаты исследования  
и их обсуждение**

Для подтверждения результативности изложенного выше метода рассмотрим тестовые примеры.

Пример 1. Пусть интенсивности переходов следующие:  $\lambda_{01}=0,10$ ;  $\lambda_{02}=0,15$ ;  $\lambda_{03}=0,20$ ;  $\lambda_{04}=0,25$ ;  $\lambda_{10}=0,30$ ;  $\lambda_{12}=0,35$ ;  $\lambda_{21}=0,40$ ;  $\lambda_{23}=0,45$ ;  $\lambda_{31}=0,50$ ;  $\lambda_{32}=0,55$ ;  $\lambda_{34}=0,60$ ;  $\lambda_{45}=0,65$ ;  $\lambda_{56}=0,70$ ;  $\lambda_{60}=0,75$ .

Сначала найдём численное решение системы уравнений (1), которая с учётом вышеприведённых интенсивностей переходов  $\{\lambda\}$  примет вид:

$$\begin{cases} 0 = -0,70p_0 + 0,3p_1 + 0,75p_6; \\ 0 = 0,1p_0 - 0,65p_1 + 0,40p_2 + 0,50p_3; \\ 0 = 0,15p_0 + 0,35p_1 - 0,85p_2 + 0,55p_3; \\ 0 = 0,20p_0 + 0,45p_2 - 1,65p_3; \\ 0 = 0,25p_0 + 0,60p_3 - 0,65p_4; \\ 0 = 0,65p_4 - 0,70p_5; \\ 0 = 0,70p_5 - 0,75p_6. \end{cases}$$

Численное решение системы уравнений стандартными компьютерными методами позволяет получить вероятности состояний:  $p_0 \approx 0,20740$ ;  $p_1 \approx 0,17742$ ;  $p_2 \approx 0,15290$ ;  $p_3 \approx 0,06684$ ;  $p_4 \approx 0,14147$ ;  $p_5 \approx 0,13136$ ;  $p_6 \approx 0,12261$ . Нетрудно убедиться, что  $\sum_{i=0}^6 p_i \approx 1$ .

Теперь получим эти вероятности состояний по выражениям (2) с учётом (3). Найдём коэффициенты  $\{K\}$ :

$$\begin{cases} K_1 = \frac{0,45 \cdot 1,65 - 0,2 \cdot 0,6}{0,45 \cdot 0,6} \cdot \frac{0,15 \cdot 0,5 - 0,1 \cdot 0,55}{0,4 \cdot 0,55 + 0,5 \cdot 0,85} \approx 0,85544; \\ K_2 = \frac{0,5(0,15 + 0,85544 \cdot 0,35) + 0,55[0,85544 \cdot 0,65 - 0,1]}{0,4 \cdot 0,55 + 0,5 \cdot 0,85} \approx 0,73724; \\ K_3 = \frac{0,2 + 0,73724 \cdot 0,45}{1,65} \approx 0,32228; \\ K_4 = \frac{0,25 + 0,32228 \cdot 0,6}{0,65} \approx 0,68211; \\ K_5 = \frac{0,65}{0,70} \cdot 0,68211 \approx 0,63338; \\ K_6 = \frac{0,70}{0,75} \cdot 0,63338 \approx 0,59116. \end{cases}$$

Из выражения (2) находим вероятности состояний:

$$\begin{cases} p_0 = \frac{1}{1 + 0,85544 + 0,73724 + 0,32228 + 0,68211 + 0,63338 + 0,59116} \approx 0,20740; \\ p_1 = 0,85544 \cdot 0,20740 \approx 0,17742; \\ p_2 = 0,73724 \cdot 0,20740 \approx 0,15291; \\ p_3 = 0,32228 \cdot 0,20740 \approx 0,06684; \\ p_4 = 0,68211 \cdot 0,20740 \approx 0,14147; \\ p_5 = 0,63338 \cdot 0,20740 \approx 0,13136; \\ p_6 = 0,59116 \cdot 0,20740 \approx 0,12261. \end{cases}$$

Полученные аналитическим способом значения вероятностей состояний совпадают с вероятностями, полученными численным моделированием, что свидетельствует об объективности результатов.

Пример 2. Пусть интенсивности переходов следующие:  $\lambda_{01}=\lambda_{02}=\lambda_{03}=\lambda_{04}=0,2$ ;  $\lambda_{10}=\lambda_{12}=\lambda_{21}=0,4$ ;  $\lambda_{23}=\lambda_{31}=0,5$ ;  $\lambda_{32}=\lambda_{34}=0,2$ ;  $\lambda_{45}=\lambda_{56}=\lambda_{60}=0,8$

Численное решение системы уравнений (1), которая с учётом вышеприведённых интенсивностей переходов  $\{\lambda\}$  примет вид:

$$\begin{cases} 0 = -0,8p_0 + 0,4p_1 + 0,8p_6; \\ 0 = 0,2p_0 - 0,8p_1 + 0,4p_2 + 0,5p_3; \\ 0 = 0,2p_0 + 0,4p_1 - 0,9p_2 + 0,2p_3; \\ 0 = 0,2p_0 + 0,5p_2 - 0,9p_3; \\ 0 = 0,2p_0 + 0,2p_3 - 0,8p_4; \\ 0 = 0,8p_4 - 0,8p_5; \\ 0 = 0,8p_5 - 0,8p_6. \end{cases}$$

Численное решение системы уравнений стандартными компьютерными методами позволяет получить вероятности состояний:  $p_0 \approx 0,19865$ ;  $p_1 \approx 0,22685$ ;  $p_2 \approx 0,17658$ ;  $p_3 \approx 0,14224$ ;  $p_4=p_5=p_6 \approx 0,08522$ . Нетрудно убедиться, что  $\sum_{i=0}^6 p_i \approx 1$ .

Получим эти вероятности состояний по выражениям (2) с учётом (3). Найдём коэффициенты  $\{K\}$ :

$$\begin{cases} K_1 = \frac{0,6 \cdot 0,9 - 0,2 \cdot 0,2}{0,5 \cdot 0,2} \cdot \frac{0,2 \cdot 0,5 - 0,2 \cdot 0,2}{0,4 \cdot 0,2 + 0,5 \cdot 0,9} \approx 1,14197; \\ K_2 = \frac{0,5(0,2 + 1,14197 \cdot 0,4) + 0,2[1,14197 \cdot 0,8 - 0,2]}{0,4 \cdot 0,2 + 0,5 \cdot 0,9} \approx 0,88889; \\ K_3 = \frac{0,2 + 0,88889 \cdot 0,5}{0,9} \approx 0,71605; \\ K_4 = \frac{0,2 + 0,71605 \cdot 0,2}{0,8} \approx 0,42901; \\ K_5 = \frac{0,8}{0,8} \cdot 0,42901 \approx 0,42901; \\ K_6 = \frac{0,8}{0,8} \cdot 0,42901 \approx 0,42901. \end{cases}$$

Из выражения (2) находим вероятности состояний:

$$\begin{cases} p_0 = \frac{1}{1 + 1,14197 + 0,88889 + 0,71605 + 3 \cdot 0,42901} \approx 0,19865; \\ p_1 = 1,14197 \cdot 0,19865 \approx 0,22685; \\ p_2 = 0,88889 \cdot 0,19865 \approx 0,17658; \\ p_3 = 0,71605 \cdot 0,19865 \approx 0,14224; \\ p_4 = p_5 = p_6 = 0,42901 \cdot 0,19865 \approx 0,08522. \end{cases}$$

Полученные аналитическим способом значения вероятностей состояний, как и в предыдущем примере, совпадают с вероятностями, полученными численным моделированием, что свидетельствует об объективности результатов. Разработанная модель позволяет

количественно оценивать вероятность аварийных ситуаций, прогнозировать динамику изменения уровня пожарной опасности.

### Заключение

В работе была представлена математическая модель для оценки и прогнозирования уровня пожарной опасности объектов хранения сжиженного водородного топлива. В качестве математического аппарата были выбраны цепи Маркова. В качестве расчетной величины были выбраны интенсивности переходов между состояниями системы. Такой подход позволил перейти от качественного описания пожарной опасности к ее количественной оценке.

Модель позволяет рассчитывать вероятности нахождения системы в том или ином состоянии в любой момент времени. Это дает возможность не только понимать текущий уровень опасности, но и строить прогнозы его развития.

Уникальность модели заключается в том, что она учитывает специфические

характеристики водорода, которые существенно отличаются от свойств других горючих веществ. Таким образом, представленная модель является специализированным инструментом, учитывающим уникальные характеристики водородного топлива и особенности его хранения, что делает ее неприменимой для других видов топлива без существенной модификации параметров и условий моделирования.

Практическая значимость разработанной модели заключается в создании основ для совершенствования системы безопасности хранения сжиженного водорода. Однако для полной реализации потенциала модели необходимо формирование базы данных по отказам оборудования и инцидентам на конкретном объекте хранения сжиженного водорода, которая будет включать в себя статистику отказов криогенного оборудования, данные о частоте утечек водорода, а также другим параметрам модели.

### Список литературы

1. Горячева М. О., Актерский Ю. Е., Минкин Д. Ю. Проблемы обеспечения пожарной безопасности на объектах водородной энергетики и нефтегазового комплекса // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2023. № 1 (46). С. 78–83. EDN: UBACXR.

2. Зайченко В. М., Шпильрайн Э. Э., Штеренберг В. Я. Водородная энергетика: современное состояние и направления дальнейшего развития // *Теплоэнергетика*. 2003. № 5. С. 61–67. EDN: PVOFNL.

3. Байчиева Ш., Джумаев У., Ашыров А. Перспективы и недостатки водородной энергетики // *In Situ*. 2023. № 1. С. 105–108. EDN: MOWVMY.

4. Системы хранения водорода / О. К. Алексеева, С. И. Козлов, Р. О. Самсонов [и др.] // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2009. № 5 (11). С. 72–79. EDN: KXVHNZ.

5. Домашенко А. М. Проблемы взрывобезопасности при создании и эксплуатации промышленных систем хранения и транспортирования жидкого водорода. Стандарты // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. 2006. № 11 (43). С. 28–38. EDN: HYRTYX.

6. Шебеко Ю. Н., Болодьян И. А. Международный опыт обеспечения пожарной безопасности водородных автозаправочных станций // *Научно-технический сборник «Вести газовой науки»*. 2022. № 2 (51). С. 151–159. EDN: VGVFRF.

7. Шебеко Ю. Н. Нормативные документы, регламентирующие вопросы пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики // *Пожарная безопасность*. 2020. № 4 (101). С. 36–42. DOI: 10.37657/vniipr.pb.2020.101.4.003. EDN: UNLYCV.

8. Горев В. А., Медведев Г. М. Кинетические и газодинамические причины аварийных взрывов водорода // *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22, № 11. С. 24–30. EDN: RJZZQH.

9. Бедарев И. А., Федоров А. В. Сравнительный анализ трех математических моделей воспламенения водорода // *Физика горения и взрыва*. 2006. Т. 42, № 1. С. 26–33. EDN: NXZUFX.

10. Васильков Ю. В., Василькова Н. Н. Компьютерные технологии вычислений в математическом моделировании // *Финансы и статистика*. 1999.

### References

1. Goryacheva M. O., Akterskij Yu. E., Minkin D. Yu. Problemy` obespecheniya pozharnoj bezopasnosti na ob`ektax vodorodnoj e`nergetiki i neftegazovogo kompleksa [Problems of fire safety at hydrogen energy and oil and gas complex facilities]. *Sovremennyy`e problemy` grazhdanskoy zashity`*, 2023, vol. 1 (46), pp. 78–83

2. Zajchenko V. M., Shpil`rajn E`. E`. Shterenberg V. Ya. Vodorodnaya e`nergetika: sovremennoe sostoyanie i napravleniya dal`nejshego razvitiya [Hydrogen Energy: Current State and Future Directions]. *Teploe`nergetika*, 2003, vol. 5, pp. 61–67

3. Bajchy`eva Sh., Dzhumaev U., Ashy`rov A. Perspektivy` i nedostatki vodorodnoj e`nergetiki [Prospects and disadvantages of hydrogen energy]. *In Situ*, 2023, issue 1, pp. 105–108

4. Sistemy` xraneniya vodoroda [Hydrogen storage systems] / O. K. Alekseeva, S. I. Kozlov, R. O. Samsonov [et al.]. *Transport na al`ternativnom toplive*, 2009, vol. 5 (11), pp. 72–79

5. Domashenko A. M. Problemy` vzry`vo-bezопасnosti pri sozdanii i e`kspluatatsii promy`shlenny`x sistem xraneniya i transportirovaniya zhidkogo vodoroda. Standarty` [Explosion safety issues in the design and operation of industrial systems for storing and transporting liquid hydrogen. Standards]. *Mezhdunarodny`j nauchny`j zhurnal «Al`ternativnaya e`nergetika i e`kologiya»*, 2006, issue 11(43), pp. 28-38

6. Shebeko, Yu. N., Bolod`yan I. A. Mezhdunarodny`j opy`t obespecheniya pozharnoj bezопасnosti vodorodny`x avtozapravochny`x stancij [International experience in ensuring fire safety at hydrogen gas stations]. *Nauchno-*

*texnicheskij sbornik «Vesti gazovoj nauki»*, 2022, vol. 2 (51), pp. 151–159

7. Shebeko Yu. N. Normativny`e dokumenty`, reglamentiruyushhie voprosy` pozharnoj bezопасnosti ob`ektov infrastruktury` vodorodnoj e`nergetiki [Regulatory documents governing fire safety at hydrogen energy infrastructure facilities]. *Pozharnaya bezопасnost`*, 2020, vol. 4 (101), pp. 36–42.

8. Gorev V. A., Medvedev G. M. Kineticheskie i gazodinamicheskie prichiny` avariyny`x vzry`vov vodoroda [Kinetic and gas-dynamic causes of hydrogen explosions]. *Pozharovzry`vobezопасnost`*, 2013, vol. 22, issue 11, pp. 24–30

9. Bedarev I. A., Fedorov A. V. Sravnitel`ny`j analiz trex matematicheskix modelej vosplamneniya vodoroda [Comparative analysis of three mathematical models of hydrogen ignition]. *Fizika goreniya i vzry`va*, 2006, vol 42, issue 1, pp. 26–33

10. Vasil`kov Yu. V., Vasil`kova N. N. Komp`yuterny`e tekhnologii vy`chislenij v matematicheskom modelirovanii [Computer technologies for mathematical modeling]. *Finansy` i statistika*, 1999.

*Мехоношина Мария Олеговна*

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,  
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург  
Преподаватель кафедры пожарной безопасности зданий  
и автоматизированных систем пожаротушения  
E-mail: mehonoshina.08@mail.ru  
*Mekhonoshina Maria Olegovna*  
St. Petersburg State Fire Service EMERCOM of Russia  
Russian Federation, St. Petersburg  
Lecturer department of building fire safety and automated fire fighting systems  
E-mail: mehonoshina.08@mail.ru

*Актерский Юрий Евгеньевич*

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России  
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург  
доктор военных наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности зданий  
и автоматизированных систем пожаротушения  
E-mail: akterskij.y@igps.ru  
*Akterskij Yuri Evgenievich*  
St. Petersburg State Fire Service EMERCOM of Russia  
Russian Federation, St. Petersburg  
doctor of military sciences, professor, professor department of building fire safety  
and automated fire fighting systems  
E-mail: akterskij.y@igps.ru

*Таранцев Александр Алексеевич*

Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук,  
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург  
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией  
E-mail: t\_\_54@mail.ru  
*Tarancev Aleksandr Alekseevich*  
N. S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences  
Russian Federation, St. Petersburg  
doctor of technical sciences, professor, head of the laboratory  
E-mail: t\_\_54@mail.ru