

УДК 621.942

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ПОДСЛОЙНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ

Дульнева А.В., студент гр. 3223, III курс  
Научный руководитель: Дюнова Д.Н., к.т.н., доцент  
Академия гражданской защиты МЧС России  
г. Химки

Вертикальные резервуары – сложное инженерное оборудование для хранения легко воспламеняющихся жидкостей, являющиеся основной составляющей топливно-энергетического комплекса [1]. Их функционирование сопряжено с пожарной опасностью. Для предотвращения возникновения пожара или максимального снижения возможных потерь при проектировании данных объектов предусматривают совокупность противопожарных мер. Эффективным методом борьбы с возгоранием на резервуарах является применение подслойного пожаротушения, реализуемый путем огнетушащего вещества в нижний слой горящей среды для подавления распространения огня [2]. Конструктивно система подслойного пожаротушения состоит из нескольких подсистем включающих: высоконапорный парогенератор, обратны клапан, предохранительную разрывную мембрану, задвижку, бак-дозатор, насосную установку (рис. 1).

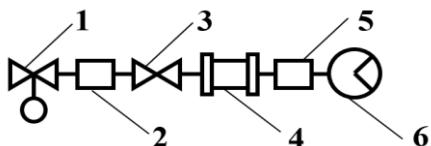


Рис. 1. Подсистема подслойного пожаротушения: задвижка (1), предохранительная разрывная мембрана (2), обратный клапан (3), высоконапорный пеногенератор (4), бак-дозатор (5), насосная установка (6)

Выбор метода исследования надежности систем зависит от ряда факторов, к числу которых можно отнести способ соединения элементов в системе, восстанавливаемость системы и т. д [3]. Подсистема подслойного пожаротушения рассмотрена как восстанавливаемая система с последовательным соединением элементов, для оценки надежностных характеристик которой использовался метод переходных интенсивностей (метод дифференциальных уравнений Колмогорова). При этом рассматривался случай, когда после отключения любого из элементов система отключается и затем производится восстановление отказавшего элемента. Это позволило сделать следующие допущения:

- отказавшие элементы системы восстанавливаются немедленно, имеет место неограниченное восстановление,
- ограничения на число восстановлений отсутствуют.

Для применения указанного метода рассмотрено множество состояний подсистемы, в которых она может находиться при отказах и восстановлениях элементов. В результате анализа состояний объекта выделено два подмножества, характеризующих работоспособные и неработоспособные его состояния, что позволило построить математическую модель подсистемы в виде взвешенного орграфа состояний (рис. 2).

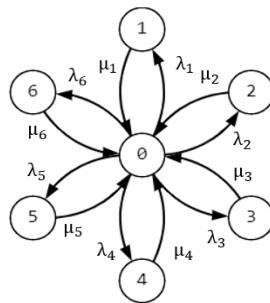


Рис. 2. Граф состояний

Вершины графа представляют собой возможные состояния подсистемы, дуги – возможные направления переходов из одного состояния в другое. Возле дуг графа указаны интенсивности отказов  $\lambda_i$  и восстановлений  $\mu_i$ . Среди сформированного множества состояний подсистемы состояние «0» рассматривалось как работоспособное, остальные состояния, определяемые отказами элементов системы, считались неработоспособными. При этом предполагалось, что во всех состояниях, кроме нулевого, система отключена и производится мгновенное восстановление отказавшего элемента [5]. Вероятность безотказного выполнения функций подсистемы характеризуется системой дифференциальных уравнений, составленной в соответствии с графиком состояний:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)P_0(t) + \mu_1 P_1(t) + \mu_2 P_2(t) + \dots + \mu_6 P_6(t), \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_1 P_0(t) - \mu_1 P_1(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_2 P_0(t) - \mu_2 P_2(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_3 P_0(t) - \mu_3 P_3(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_4 P_0(t) - \mu_4 P_4(t), \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_5 P_0(t) - \mu_5 P_5(t), \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \lambda_6 P_0(t) - \mu_6 P_6(t). \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $P_i(t)$  - вероятности пребывания подсистемы в состояниях  $i = 0,1\dots,6$ ,  
 $\lambda_j$  - интенсивности переходов подсистемы в неработоспособные состояния  
 $j = 1,\dots,6$ ,  $\mu_j$  - интенсивности восстановления элементов подсистемы из неработоспособных состояний  $j = 1,\dots,4$  в работоспособное.

Для любого момента времени:

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) = 1. \quad (2)$$

Используя встроенные функции вычислительной среды MathCAD для численного решения систем дифференциальных уравнений, получено, что вероятность безотказной работы системы  $P_0 = 0,993$ . Решение системы уравнений в виде графиков зависимостей вероятности безотказной работы от времени позволяет определить вероятности нахождения системы в каждом из состояний. Функция готовности определялась вероятностью нахождения системы в состоянии «0» [5]:

$$K_e(t) = P_0(t) = k_e + (1 - k_e) \exp \left[ -\frac{1}{k_e} \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{j=1}^n \mu_j} t \right], \quad (3)$$

где  $k_e$  - коэффициент готовности системы:

$$k_e = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_j}{\mu_j}}. \quad (4)$$

Разработанная в MathCAD программа позволила определить коэффициент готовности системы  $k_e = 1$  и функцию готовности  $K_e(t)$ .

В результате исследования надежности автоматической послойного пожаротушения определены основные показатели надежности. Полученные значения коэффициента и функции готовности позволяют говорить о достаточно высокой эффективности и надежности функционирования объекта исследования.

### Список литературы:

1. ГОСТ 31385-2023. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2023. – 122 с.
2. Дюнова Д.Н. Инновационные решения в сфере обеспечения противопожарной защиты оборудования резервуарных парков / Д.Н. Дюнова, В.Н. Лымарев // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов : сборник материалов всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 20 апреля 2023 года. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. – С. 182-186.

3. Ястребенецкий М.А. Надежность Автоматизированных систем управления технологическими процессами : учеб. пособие для вузов / М.А. Ястребенецкий, Г.М. Иванова. – Москва.: Энергоатомиздат, 1989 – 264 с.
4. Дюнова Д.Н. Об исследовании надежности технических средств на основе опытных данных / Д.Н. Дюнова // Труды СКГМИ (ГТУ). – 2008. – № 15. – С. 201-203.
5. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, М.Г. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006 – 704 с.