УДК 614.841.45
DOI 10.47367/0021-3497_2025_5_306

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ СИСТЕМ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЖАРА НА ТЕКСТИЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

PROBABILISTIC APPROACH TO CREATING FIRE DETECTION SYSTEMS IN A TEXTILE ENTERPRISE

А.А. ЛАЗАРЕВ, В.А. ТИТОВ, А.А ЛОБОВА, О.Е. СТОРОНКИНА, А.А. КРАСНОВ

A.A. LAZAREV, V.A. TITOV, A.A. LOBOVA, O.E. STORONKINA, A.A. KRASNOV

(Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России)

(Ivanovo Fire and Rescue Academy of the SFC of EMERCOM of Russia)

E-mail: kpond@edufire37.ru, titov25@gmail.com, annett79@mail.ru, oleg1968@mail.ru

Пожары на текстильных предприятиях характеризуются специфическими особенностями, связанными с использованием легковоспламеняющихся материалов и пожароопасных технологических процессов. Эти пожары могут привести к значительным материальным потерям, включая повреждение производственного оборудования, обрушение конструкций зданий и уничтожение готовой продукции. Кроме того, пожары на текстильных фабриках представляют серьезную угрозу для здоровья и жизни работников, что делает особо актуальной проблему их прогнозирования и предотвращения.

В связи с этим необходимо осуществлять комплексный анализ рисков, обеспечивая оптимальный вариант проектного управления с учетом вероятностных характеристик потенциальных угроз. В статье рассмотрен процесс моделирования перехода системы из одного состояния в другое при распространении пожара между зданиями. В рамках численных экспериментов определены предельные асимптотические вероятности для рассматриваемой системы при различных значениях состояний и интенсивности потока событий. Рассчитанные вероятности позволяют определять места установки средств для обнаружения пожара. Данные средства устанавливаются вне зданий исходя из наиболее вероятных путей распространения пламени.

Fires in textile factories have specific features. These features are associated with the use of flammable materials and fire-hazardous technological processes. These fires can lead to significant material losses. These losses include damage to production equipment, collapse of building structures and destruction of finished products. Fires in textile factories pose a serious threat to the health and lives of workers. This makes the problem of their prediction and prevention particularly relevant. Taking into account the probabilistic approach, the article considers the process of modeling the transition of a system from one state to another when a fire spreads between buildings. Within the framework of numerical experiments, the limiting asymptotic probabilities for the system under consideration are determined for various values of states and the intensity of the event flow. The calculated probabilities allow us to determine the installation locations of fire detection equipment. These facilities are installed outside buildings based on the most probable flame propagation paths.

Ключевые слова: вероятностный подход, пожар, текстильное предприятие, графы, система.

Keywords: probabilistic approach, fire, textile enterprise, graphs, system.

Введение

В зарубежной практике вероятностный подход к обнаружению пожаров активно применяется с начала 2000-х годов. Группа американских исследователей описала вероятностную модель для оценки времени срабатывания устройств обнаружения пожара, установленных на потолке. Разработанная ими вероятностная модель основана на детерминированной модели DETACT путем введения функций распределения вероятностей вместо точечных оценок параметров, определяющих срабатывание пожарного извещателя, включая предысторию скорости выделения тепла при пожаре, температуру срабатывания, показатель времени срабатывания и местоположение устройства. В вероятностной модели были учтены только неопределенности параметров. Неопределенности модели, связанные с детерминированной моделью для оценки времени срабатывания пожарных извещателей, не были рассмотрены [1].

Китайские ученые предложили усовершенствованный вероятностный подход к обнаружению пожаров в зданиях, использующий цветовые признаки и признаки движения. Улучшенная вероятностная модель для обнаружения пожара на основе цвета генерирует возможные области возгорания. Затем для принятия окончательного решения используется улучшенная функция анализа движения [2].

Применение вероятностного подхода к обнаружению пожара на видео было предложено не только для наблюдения, но и для автоматической классификации видео для поиска информации о пожарах в базах дан-

ных новостного контента. Авторы исследования, проведя эксперименты, подтвердили применимость метода анализа изменений конкретных низкоуровневых характеристик, описывающих потенциальные области пожара, от кадра к кадру – цвета, размера площади помещения, шероховатости поверхности, неровности границ и асимметрии в пределах предполагаемых областей пожара [3].

Исследователями из Китая разработана вероятностная модель для прогнозирования жертв пожара в городском транспортном туннеле с естественной вентиляцией, учитывающая влияние температуры и распределения окиси углерода, а также расположение различных транспортных средств. Результаты показали, что число жертв при пожаре увеличивается с увеличением максимальной скорости тепловыделения. Кроме того, если расстояние между источником пожара и эвакуационным выходом сократить до 150 м, влияние максимальной скорости тепловыделения значительно снизится [4].

Анализ зарубежных научных изданий показывает отсутствие исследований по применению вероятностного подхода к созданию систем для обнаружения пожара на текстильном предприятии.

Разработка и создание систем обнаружения пожара на текстильных предприятиях в зарубежной историографии (Китай, Бангладеш, Индия) анализируются с использованием информационных технологий. При этом применяются такие средства информатизации, как облачные платформы, интеллектуальные системы контроля, нейронные сети.

После обрушения производственного комплекса в Бангладеш в 2013 году, в результате которого погибли более 1100 человек, и пожара на швейной фабрике в 2012 году, унесшего жизни 12 человек, проблема обнаружения пожаров на текстильных объектах встала наиболее остро и ей было уделено особое внимание в публикациях ученых из данного государства [5…8].

Преимуществам использования продвинутых информационных технологий для управления пожарной безопасностью строительных конструкций в целом посвящена статья индийских авторов [9]. Авторы отмечают, что благодаря датчикам, данным и аналитике с поддержкой Интернета вещей в сочетании с алгоритмами прогнозирования для сценариев в режиме реального времени системы пожарной безопасности стали динамичными, обеспечивающими раннее обнаружение, быстрое реагирование и управление рисками. Кроме того, облачные вебрешения улучшают хранение информации.

Таким образом, на данный момент самым активно развивающимся направлением в совершенствовании систем обнаружения пожаров на текстильных предприятиях является интеграция в процесс контроля за обнаружением пожаров продвинутых информационных технологий (Industry Revolution 4.0 (IR 4.0)), таких как облачные вычисления и аналитика, искусственный интеллект и машинное обучение, а также Интернет вещей (IoT).

Специфика современных текстильных производств характеризуется их размещением в окружении иных производств и объектов различного назначения. Обычно у соседних объектов разные правообладатели. Из-за этого на каждом объекте выстраивается обособленная система противопожарной защиты. В этих условиях вероятностный подход будет способствовать рациональному выбору мест установки средств для раннего обнаружения пожара на соседнем объекте при наименьших затратах на их монтаж.

С учетом изложенного определена цель данного исследования. Она заключалась в разработке способа определения мест размещения специальных устройств для обнаружения пожаров в соседствующих зданиях [10, 11] на основе марковских процессов.

Объектом исследования являлась система, в которую входит три рядом расположенных здания. Расстояние между этими зданиями позволяет допустить переход пламени при пожаре с одного объекта на другой.

В качестве предмета исследования рассматривается процесс моделирования перехода системы из одного состояния в другое при открытом пожаре. Каждое из состояний характеризуется переходом пожара на один из трех объектов рассматриваемой системы.

На основе проведенного анализа авторами предложено использовать вероятностный подход в целях рационального выбора мест

установки средств для раннего обнаружения пожара с внешней стороны группы зданий, включающей в себя три объекта защиты.

Описание модели

При определении мест размещения специальных устройств для обнаружения пожаров в соседних зданиях [10, 11] целесообразно рассмотреть систему PRS с происходящим в ней марковским случайным процессом при дискретных состояниях d_1, d_2, d_3 [12]. Три состояния выбраны в силу того, что на практике данная ситуация наиболее часто встречается. В этом случае переходы системы из состояния в состояние происходят в случайных моментах времени. Данные переходы возникают под воздействием пуассоновского потока событий с интенсивностью δ_{ij}=const. Количественная привязка данного параметра осуществляется в зависимости от расстояния между объектами защиты. Чем меньше расстояние, тем интенсивность выше.

Предпосылки пуассоновского потока событий включают стационарность, ординарность и отсутствие последействия. В рассматриваемом случае стационарность предполагает, что вероятность возникновения того или иного количества переходящих с объекта на объект (далее – трансобъектных) пожаров за какой-либо интервал времени зависит только от продолжительности этого временного интервала и не зависит от точки его отсчета. Ординарность обозначает, что вероятность попадания на небольшой участок времени двух или более событий возникновения трансобъектных пожаров пренебрежимо мала в сравнении с вероятностью попадания на него одного события появления такого пожара. Под отсутствием последействия следует понимать то, что для любых непересекающихся временных участков числа событий возникновения трансобъектных пожаров, попадающих на эти участки, выступают в качестве независимых случайных величин. Следовательно, вероятность попадания любого числа таких событий на один из временных участков не зависит от количества их попадания на другие. Это позволяет составить размеченный граф состояний системы PRS для некоторой группы из трех зданий текстильного предприятия, которые в непосредственной близости расположены друг от друга: склад готовой продукции, хозяйственная постройка, административно-бытовой корпус. Пример размеченного графа состояний системы PRS представлен на рис. 1.

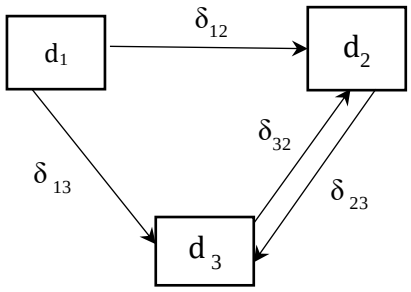

Рис. 1

На рис. 1…4 состояние d_1 характеризуется наличием предпосылок к переходу пожара на склад готовой продукции. Это позволяет описать условия для системы PRS. При состоянии d_2 пожар переходит на хозяйственную постройку. Для состояния d_3 пожар перемещается на административно-бытовой корпус.

Для системы PRS система дифференциальных уравнений представляется следующим образом [12]:

$$\begin{cases} \frac{d\nu_1(t)}{dt} = -(\delta_{12} + \delta_{13})\nu_1(t), \\ \frac{d\nu_2(t)}{dt} = \delta_{12}\nu_1(t) + \delta_{32}\nu_3(t) - \delta_{23}\nu_2(t), \\ \frac{d\nu_3(t)}{dt} = \delta_{13}\nu_1(t) + \delta_{23}\nu_2(t) - \delta_{32}\nu_3(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $\frac{d\nu_i(t)}{dt}$ – производная вероятностей d_1 состояния; δ_{ij} – интенсивность потока событий; $\nu_i(t)$ – предельное вероятностное состояние; t – случайные моменты времени.

Для нахождения предельных вероятностей в уравнениях Колмогорова принимается $\frac{d\nu_i(t)}{dt} = 0$, затем система алгебраических уравнений решается с учетом условия $\sum_{i-1}^{n} \nu_i(t) = 1$.

Результаты и обсуждение

На рис. 2…4 представлены размеченные графы трех различных систем PRS с заданными значениями интенсивности потока событий. Изменения интенсивности переходов связаны с расстояниями между зданиями и преобладающим направлением ветров. Чем меньше данное расстояние и при нахождении здания с подветренной стороны, тем выше значения интенсивности переходов для данного объекта.

На рис. 2 приведена система PRS_1.

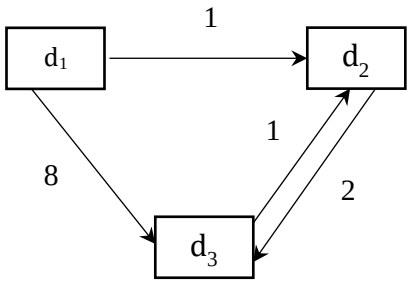

Рис. 2

Для системы PRS_1 система дифференциальных уравнений будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{dv_1(t)}{dt} = -8v_1, \\ \frac{dv_2(t)}{dt} = v_1 + v_3 - 2v_2, \\ \frac{dv_3(t)}{dt} = 8v_1 + 2v_2 - v_3, \end{cases} \quad (2)$$

При решении данной системы получим предельные вероятности для системы PRS_1. Они будут равны: v_1=0; v_2=0,333; v_3=0,667.

Рассмотрим вариант перехода пожара на рис. 3. Здесь представлена система PRS_2.

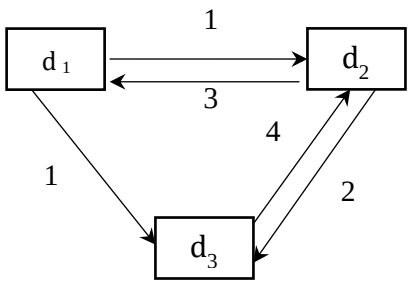

Рис. 3

Система дифференциальных уравнений для данного случая представлена формулой:

$$\begin{cases} \frac{dv_1(t)}{dt} = 3v_2, -2v_1, \\ \frac{dv_2(t)}{dt} = v_1 + 4v_3 - 5v_2, \\ \frac{dv_3(t)}{dt} = v_1 + 2v_2 - 4v_3, \end{cases} \quad (3)$$

По итогам решения данной системы определяются предельные вероятности для системы PRS_2. Они будут равны: v_1=0,444; v_2=0,297; v_3=0,259.

Рассмотрим систему PRS_3 на рис. 4.

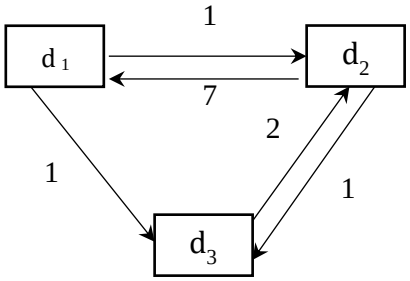

Рис. 4

Для системы PRS_3 система дифференциальных уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dv_1(t)}{dt} = 7v_2 - 2v_1, \\ \frac{dv_2(t)}{dt} = v_1 + 2v_3 - 9v_2, \\ \frac{dv_3(t)}{dt} = v_1 + v_2 - 2v_3, \end{cases} \quad (4)$$

При решении данной системы рассчитываются предельные вероятности для системы PRS_3. Они будут равны: v_1= 0,519; v_2= 0,148; v_3= 0,333.

Проведенный расчет показал изменения значений предельной вероятности при сравнении систем PRS_2 и PRS_3. В условиях изменения интенсивности потока событий из состояния d_2 в состояние d_3 с 2 до 1, увеличения потока событий из состояния d_3 в состояние d_2 с 4 до 2 вероятность v_1 увеличивается до 0,519, вероятность v_2 уменьшается до 0,148, вероятность v_3 повышается до 0,333. При переходе системы PRS_1 в PRS_3

вероятность ν_1 увеличивается до 0,519, ν_2 уменьшается до 0,148; ν_3 уменьшается до 0,333. В условиях систем PRS_2 и PRS_3 пожар возникнет на складе готовой продукции. При этом место первоочередной установки средств для обнаружения пожара должно быть определено: для системы PRS_2 – на здании хозяйственной постройки; для системы PRS_3 – на здании административно-бытового корпуса, так как данный параметр имеет наибольшее значение по сравнению с другими после значения ν_1. Аналогично для системы PRS_1 такое место должно определяться в этом же здании.

ВЫВОДЫ

В работе проводился ряд численных экспериментов при различной интенсивности потока событий для трех состояний, предполагающих переход пожара с одного объекта на другой.

Определены предельные вероятности для систем PRS_1, PRS_2, PRS_3. Для системы PRS_1 и PRS_3 наибольший риск представляет состояние d_1, а для системы PRS_1 – состояние d_3. Для системы PRS_1 и PRS_3 средства для обнаружения пожара следует устанавливать на здании административно-бытового корпуса, а для систем PRS_2 – на здании хозяйственной постройки, так как предельные вероятности для данных состояний будут меньше максимальных, но больше минимальных значений.

Результаты могут быть использованы для проведения дальнейших расчетов в целях определения мест установки средств обнаружения пожаров вне зданий.

В реальных условиях предложенная модель может использоваться при расстановке средств для обнаружения пожаров вне зданий текстильного предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Joglar F. & Mowrer F. & Modarres M.* A Probabilistic Model for Fire Detection with Applications // Fire Technology. 2005. V. 41. P. 151…172. – DOI:10.1007/s10694-005-1268-7

2. *Zhang Zhijie, Shen Tian, Zou Jianhua.* An Improved Probabilistic Approach for Fire Detection in Videos // Fire Technology. 2014. V. 50, № 3, P. 745…752. – DOI: 10.1007/s10694-012-0253-1

3. *Borges P.V.K., Izquierdo E.* A Probabilistic Approach for Vision-Based Fire Detection in Videos // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2010. V. 20, №. 5. P. 721…731. – DOI: 10.1109/TCSVT.2010.2045813.

4. *Zhu R., Zhang D, Huang Zhong-Kai.* Probabilistic model for predicting fire casualties in an urban traffic tunnel // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2024. V. 1333, № 1. P. 012002. – DOI: 10.1088/1755-1315/1333/1/012002.

5. *Barua Alak, Sharmili Nowsheen*. Design and Implementation of Addressable Fire Detection and Alarm System in Ready-made Garments Sector of Bangladesh // Conference paper. At: International Conference on Mechanical Industrial and Energy Engineering. 2021. – Khulna University of Engineering and Technology. Conference Proceedings. – https://www.researchgate.net/publication/348807283/

6. *Karim Mohammad, Kabir Sohag Lei C., Lefticaru Raluca, Baset Mohammad.* IoT Integrated Fire Prevention and Alert Systems for Garments Industries in Bangladesh // 6th Industrial Engineering and Operations Management Bangladesh Conference. 2023. Conference Proceedings. – DOI: 10.46254/BA06.20230230

7. *Shabrina Kabir, Md Esrafil Hossain Riyad, Umama Tasnim Tanisha et al.* Automatic Fire Monitoring System in Textile Industry // Proceedings of the 11th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE). 2020. P. 471…474. – DOI:10.1109/ICECE51571.2020.9393112

8. *Mim I.Z., Rayhan M.G.S., Syduzzaman M.* Prospects and current scenario of industry 4.0 in Bangladeshi textile and apparel industry // Heliyon. 2024. V. 10, № 11. P. e32044. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e32044.

9. *Negi P., Pathani A., Bhatt B.C. et al.* Integration of Industry 4.0 Technologies in Fire and Safety Management // Fire. 2024. V. 7, № 10. P. 335. – DOI: 10.3390/fire7100335.

10. Пат. на полезную модель RU 198053 U1. Совмещенный с пожарным извещателем бетонный блок.

11. *Федосов С.В., Ватин Н.И., Лазарев А.А. и др.* Противопожарный контроль соседних зданий при помощи сенсоров "умного дома" // Современные проблемы гражданской защиты. 2020. № 3(36). С. 125…135. – EDN RKOVKE.

12. *Гренандер У.* Краткий курс вычислительной вероятности и статистики. М.: Наука, 1978. 192 с.

REFERENCES

1. *Joglar F. & Mowrer F. & Modarres M.* A Probabilistic Model for Fire Detection with Applications // Fire Technology. 2005. V. 41. P. 151…172. – DOI:10.1007/s10694-005-1268-7

2. *Zhang Zhijie & Shen Tian & Zou Jianhua.* An Improved Probabilistic Approach for Fire Detection in Videos. // Fire Technology. 2014. V. 50, № 3, P. 745…752. – DOI: 10.1007/s10694-012-0253-1

3. *Borges P.V.K. and E. Izquierdo*. A Probabilistic Approach for Vision-Based Fire Detection in Videos // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video

Technology. 2010. V. 20, №. 5. P. 721…731. – DOI: 10.1109/TCSVT.2010.2045813.

4. *Zhu R & Zhang, D & Huang Zhong-Kai.* Probabilistic model for predicting fire casualties in an urban traffic tunnel // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2024.V. 1333, № 1. P. 012002. – DOI: 10.1088/1755-1315/1333/1/012002.

5. *Barua Alak and Sharmili Nowsheen*. Design and Implementation of Addressable Fire Detection and Alarm System in Ready-made Garments Sector of Bangladesh // Conference paper. At: International Conference on Mechanical Industrial and Energy Engineering. – 2021. – Khulna University of Engineering and Technology. Conference Proceedings. – https://www.researchgate.net/publication/348807283/

6. *Karim Mohammad, Kabir Sohag, Lei C., Lefticaru Raluca, Baset Mohammad.* IoT Integrated Fire Prevention and Alert Systems for Garments Industries in Bangladesh // 6th Industrial Engineering and Operations Management Bangladesh Conference. 2023. Conference Proceedings. – DOI: 10.46254/BA06.20230230

7. *Shabrina Kabir, Md Esrafil Hossain Riyad, Umama Tasnim Tanisha et al.* Automatic Fire Monitoring System in Textile Industry. // Proceedings of the 11th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE). 2020. P. 471…474. – DOI:10.1109/ICECE51571.2020.9393112

8. *Mim I.Z., Rayhan M.G.S., Syduzzaman M.* Prospects and current scenario of industry 4.0 in Bangladeshi textile and apparel industry // Heliyon. 2024. V. 10, № 11. P. e32044. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e32044.

9. *Negi P., Pathani A., Bhatt B.C. et al.* Integration of Industry 4.0 Technologies in Fire and Safety Management // Fire. 2024. V. 7, № 10. P. 335. – DOI: 10.3390/fire7100335.

10. Patent 198053 U1 (RU), IPC E04C 1/39, E04B 1/94. Concrete block combined with fire detector.

11. *Fedosov S.V., Vatin N.I., Lazarev A.A. et al.* Fire control of neighboring buildings using smart home sensors // Contemporary Issues of Civil Defense. 2020. №. 3 (36). P. 125…135. – EDN RKOVKE.

12. *Grenander U.* Kratkiy kurs vychislitel'noy veroyatnosti i statistiki. Moscow: Nauka, 1978. 192 p.

Рекомендована кафедрой правового обеспечения надзорной деятельности (в составе УНК «Государственный надзор») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России. Поступила 07.07.25.