

УДК 681.3

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.34.3.005](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.34.3.005)

Оценка риска распространения пожара на прилегающие территории

П.С. Куприенко, И.В. Фурсов

*Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Российская Федерация*

Резюме. В статье решается задача количественной оценки риска распространения пожара от источника до объектов, находящихся на прилегающей территории с учетом вероятной динамики этого процесса. При этом риск отождествляется с вероятностями наступления неблагоприятных событий, связанных с возникновением начального и промежуточных источников пожара и созданием условий для распространения пожара на прилегающие территории. Для решения задачи использован математический аппарат дискретных цепей Маркова с двенадцатью вероятностными состояниями, два из которых являются поглощающими: возгорание и не возгорание объектов, размещенных на прилегающих территориях, и два – начальными: возникновение / отсутствие первичного источника пожара. Цепь Маркова формализуется в виде системы алгебраических уравнений, решение которой дает искомый результат. Особенность алгоритма заключается в том, что порядок проведения расчетов зависит от возможного сценария развития процесса распространения пожара. Причем, учитываются как прямые возгорания, когда пожар распространяется непосредственно от первичного источника к объекту возгорания, так и по цепочке, когда пожар распространяется последовательно от одного объекта к другому. Алгоритм может найти применение в муниципальных противопожарных службах.

Ключевые слова: пожарная безопасность, риск распространения пожара, дискретная цепь Маркова, алгоритм расчета риска, сценарий развития пожара.

Для цитирования: Куприенко П.С., Фурсов И.В. Оценка риска распространения пожара на прилегающие территории. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(3). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=986> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.xxx

Assessment of the risk of fire spreading to adjacent territories

P.S. Kuprienko, I.V. Fursov

*Voronezh State Technical University,
Voronezh, Russian Federation*

Abstract: The article solves the problem of a quantitative assessment of the risk of fire spread to objects adjacent to construction sites, considering the likely dynamics of this process. In this case, the risk identified occurring with the probabilities of adverse events associated with the occurrence of initial and intermediate sources of fire and the creation of conditions for the spread of fire to adjacent territories. The mathematical apparatus of discrete Markov chains with twelve states are used to solve the problem, two of which are absorbing: ignition and non-ignition of objects adjacent to construction sites. The Markov chain is formalized as a system of algebraic equations, the solution of which gives the desired result. The peculiarity of the algorithm is that the calculation procedure depends on the possible scenario of the development of the fire propagation process. Both direct fires are considered when the fire spreads directly from the primary source to the ignition object and along the chain when the fire propagates sequentially from one place to another. The algorithm can find applications in municipal fire services.

Keywords: fire safety, fire propagation risk, discrete Markov chain, risk calculation algorithm, fire development scenario.

For citation: Kuprienko P.S., Fursov I.V. Assessment of the risk of fire spreading to adjacent territories. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(3). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=986> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.005 (In Russ).

Введение

Задача оценки риска распространения пожара на прилегающие территории всегда находилась в центре внимания противопожарных служб. Особую значимость эта задача приобретает в местах плотной городской застройки, в парковых и лесных зонах, а также, когда речь идет об объектах с повышенным уровнем пожарной опасности (автозаправочные станции, хранилища горюче-смазочных материалов, газораспределительные и электроподстанции подстанции и т.п.). Согласно действующему законодательству [1-4] она решается на основе использования противопожарных норм и стандартов путем реализации типового цикла, включающего [5]:

- 1) выявление, определение и идентификация вероятных источников пожарной опасности;
- 2) выявление, определение и идентификация возможных путей распространения пожаров на примыкающие территории и построение вероятных сценариев развития пожаров;
- 3) оценка возможностей сил и средств предупреждения пожаров и пожаротушения, а также их готовности выполнять возложенные функции;
- 4) сбор и подготовка статистических данных по параметрам пожаров на типовых объектах и каналов их распространения на прилегающие объекты;
- 5) оценка риска распространения пожаров, предусматривающая обобщение данных, полученных на предшествующих этапах, и собственно проведение расчетов;
- 6) разработка комплекса мероприятий по снижению риска возникновения и распространения пожаров на прилегающие территории.

Конструктивность такого подхода неоднократно подтверждена на практике. Вместе с тем следует отметить, что расчеты по оценке риска возникновения и распространения пожаров традиционно осуществляются с использованием простейших формул теории вероятности, что не всегда адекватно динамике этих процессов. Отмеченное обстоятельство вынуждает изыскивать новые подходы к решению задачи оценки риска распространения пожара на прилегающие территории, которые: а) вписывались в общий цикл управления процессами обеспечения пожарной безопасности; б) допускали учет нормативно-статистической информации; в) позволяли оперативно получать количественные оценки рисков с учетом особенностей источников возгорания и вероятной динамики распространения пожаров.

Цель статьи заключается в разработке алгоритма оценки риска распространения пожара от источника до объектов, находящихся на прилегающей территории, с учетом вероятной динамики этого процесса.

Основные теоретические положения

Первое положение заключается в том, что моделируемый объект рассматривается как ветвящийся процесс, в котором риск возникновения и распространения пожара на объекты, расположенные на прилегающей территории, непосредственно связывается с вероятностями наступления неблагоприятных событий, а именно:

- созданием условий возникновения первичного источника пожара (S_1);
- возникновением пожара (S_2);

- наличием условий для распространения пожара на объекты, находящиеся на прилегающей территории (S_3);
- распространением пожара на объекты, расположенные на примыкающей территории (S_4);
- наличием условий для возгорания объектов, находящихся на примыкающей территории (S_5);
- возгоранием этих объектов (S_6).

Второе положение сводится к тому, что указанные события реализуются совместно с противоположными им событиями:

- отсутствием условий возникновения первичного источника пожара – S_7 и, соответственно, не возникновением пожара – S_8 ;
- отсутствием условий для распространения пожара на объекты, находящиеся на прилегающей территории – S_9 ; и, соответственно, не распространением пожара на эти объекты – S_{10} ;
- отсутствием условий для возгорания объектов, находящихся на примыкающей территории – S_{11} ; и, соответственно, не возгоранием этих объектов – S_{12} .

Эти условия трактуются как возможные состояния общего вероятностного процесса возникновения пожара его распространения на объекты, находящиеся на примыкающей территории.

Согласно этому положению динамика моделируемого процесса для случая одного источника пожара и одного объекта на примыкающей территории может быть представлена в виде периодического стохастического графа, изображенного на Рисунке 1, где символами $S_i (i = \overline{1,12})$ обозначены перечисленные выше состояния процесса, а стрелками – вероятные направления переходов из состояния в состояние.

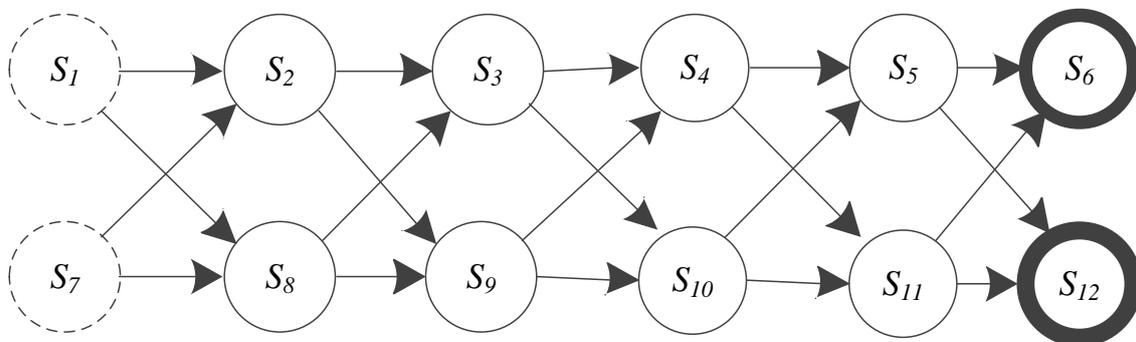


Рисунок 1 – Графическое представление процесса возникновения и распространения пожара на прилегающие территории

Figure 1 – Graphical representation of the process of occurrence and spread of fire to adjacent territories

Третье положение заключается в том, что в качестве адекватного математического аппарата, формализующего описанный выше процесс, предлагается использовать конечную дискретную цепь Маркова [12] с двенадцатью состояниями $S_i (i = \overline{1,12})$, два из которых S_6 и S_{12} , являются поглощающими (финальными) и два – начальными (S_1 и S_7), и матрицей переходных вероятностей $\|p_{ij}\|, (i, j = \overline{1,12})$, имеющей следующий вид:

$$\|p_{ij}\| = \begin{pmatrix} 0 & p_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{18} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{29} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{310} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{411} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{512} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{72} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{78} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{83} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{89} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{94} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{910} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{105} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{1011} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{116} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{1112} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Для построения вычислительной процедуры будем исходить из следующих допущений:

а) вероятности пребывания $P_i (i = \overline{1,12})$ рассматриваемого процесса в состояниях $S_i (i = \overline{1,12})$ зависит только от состояний непосредственно ему предшествующих, вне зависимости от того по какой траектории развивался процесс до этого состояния;

б) процесс возгорания и распространения пожара развивается пошагово, как это предписано графом, изображенном на Рисунке 1, при этом на каждом шаге он может находиться в одном из состояний S_1 или S_7 , S_2 или S_8 , S_3 или S_9 , S_4 или S_{10} , S_5 или S_{11} , S_6 или S_{12} , то есть:

$$\begin{aligned} P_1 + P_7 &= 1; P_2 + P_8 = 1; P_3 + P_9 = 1; \\ P_4 + P_{10} &= 1; P_5 + P_{11} = 1; P_6 + P_{12} = 1; \end{aligned} \quad (1)$$

в) матрица переходных вероятностей $\|p_{ij}\|, (i, j = \overline{1,12})$ остается неизменной в течение всего процесса;

г) сумма вероятностей переходов из всех состояний (кроме поглощающих) равна единице, то есть:

$$\begin{aligned} p_{11} &= 1 - p_{18}; p_{23} = 1 - p_{29}; p_{34} = 1 - p_{310}; p_{45} = 1 - p_{411}; p_{56} = 1 - p_{512}; \\ p_{78} &= 1 - p_{72}; p_{89} = 1 - p_{83}; p_{910} = 1 - p_{94}; p_{1011} = 1 - p_{105}; p_{1112} = 1 - p_{116}. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда для расчета вероятностей состояния моделируемого процесса $P_i (i = \overline{1,12})$, можно использовать следующую систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} P_2 = P_1 p_{12} + P_7 p_{72}; & P_8 = P_7 p_{78} + P_1 p_{18}; \\ P_3 = P_2 p_{23} + P_8 p_{83}; & P_9 = P_8 p_{89} + P_2 p_{29}; \\ P_4 = P_3 p_{34} + P_9 p_{94}; & P_{10} = P_9 p_{910} + P_3 p_{39}; \\ P_5 = P_4 p_{45} + P_{10} p_{105}; & P_{11} = P_{10} p_{1011} + P_4 p_{411}; \\ P_6 = P_5 p_{56} + P_{11} p_{116}; & P_{12} = P_{11} p_{1112} + P_5 p_{512}; \end{cases} \quad (3)$$

при начальных условиях $P_1 = P_1^*, P_2 = P_2^*$ и нормировочных условиях (1)-(2).

Четвертое положение выражается в том, что вероятности переходов p_{ij} рассматриваются как исходные данные, которые задаются конкретно для каждого процесса, например, используя нормативно-статистические данные, представленные в [6-9]. В том случае, когда получить такие данные не представляется возможным, либо объект обладает уникальными характеристиками в плане пожарной опасности, для оценки вероятностей p_{ij} целесообразно использовать экспертные методы [10,11].

Пятое положение заключается в том, что при наличии даже одного начального источника пожара процесс его распространения на объекты, находящиеся на прилегающей территории, может развиваться по различным сценариям. Причем, возможны как прямые возгорания, когда пожар распространяется непосредственно от первичного источника к объекту возгорания, так и по цепочке, когда пожар распространяется последовательно от одного объекта к другому. Для учета этих вариантов предлагается описывать возможные сценарии распространения пожара в виде матрицы $M \|\alpha_{ij}\|$, каждый элемент которой $\alpha_{ij} = 1$, если пожар на i -м объекте может привести к пожару j -м объекте, и $\alpha_{ij} = 0$ – в противном случае. При этом возникают несколько вариантов расчета риска возгорания конкретного объекта. Первый вариант, когда источником возгорания i -го объекта может служить пожар только на j -м объекте, то есть $\sum_{j=1}^N \alpha_{ij} = 1$. В этом случае для расчета риска распространения пожара используется

описанная выше модель (рисунок 1). Второй вариант возникает тогда, когда $\sum_{j=1}^N \alpha_{ij} > 1$,

то есть источником возгорания i -го объекта может служить пожар на нескольких объектах. В этом случае, с использованием той же модели для каждого источника пожара рассчитываются вероятности P_{116} , и среди них выбирается максимальное значение. Третий вариант, имеет место тогда, когда пожар распространяется по цепочке. В этом варианте модель используется пошагового, причем на каждом шаге начальными вероятностями служат конечные вероятности, полученные на предыдущем шаге.

Сущность алгоритма

Укрупненная схема алгоритма оценки риска распространения пожара на прилегающие территории, разработанная с учетом приведенных выше положений, представлена на Рисунке 2.

В соответствии с этой схемой расчеты проводятся пошагово.

Шаг 1. Выбор сценария возникновения и распространения пожара, по результатам которого осуществляется означивание матрицы $M \|\alpha_{ij}\|$ с указанием первичного источника пожара и конкретных объектов на прилегающей территории.

Шаг 2. Оценка достаточности исходных данных, прежде всего касающихся вероятностей переходов p_{ij} . Если исходных данных достаточно для проведения расчетов, то переходим к шагу 4. В противном случае переходим к шагу 3.

Шаг 3. Экспертное определение переходных вероятностей p_{ij} с использованием стандартной методики [10,11].

Шаг 4. Формирование схемы проведения расчетов применительно к выбранному сценарию. Расчет вероятностей состояния моделируемого процесса $P_i (i = \overline{1,12})$, путем решения систем алгебраических уравнений (3).

Шаг 5. Оценка риска возгорания объектов, находящихся на территории, примыкающей к первичному источнику пожара, с использованием формулы (4):

$$P_6(i) = \begin{cases} P_6(i) \leq 0,2 - \text{допустимый}; \\ 0,2 < P_6(i) \leq 0,4 - \text{угрожающий}; \\ 0,4 < P_6(i) \leq 0,85 - \text{критический}; \\ P_6(i) > 0,85 - \text{катастрофический}. \end{cases} \quad (4)$$

Шаг 6. Вывод расчетных данных и представление их пользователю.



Рисунок 2 – Алгоритм оценки риска возникновения и распространения пожара на прилегающие территории

Figure 2 – Algorithm for assessing the risk of fire occurrence and spread to adjacent territories

Заключение

Разработанный алгоритм оценки риска возникновения и распространения пожара на прилегающие территории, в отличие от известных алгоритмов подобного типа учитывает вероятную динамику этого процесса и возможные сценарии его развития. Он базируется на математическом аппарате дискретных цепей Маркова с двенадцатью состояниями, два из которых являются поглощающими. Для задания переходных вероятностей рекомендовано использовать нормативно-статистические данные по возникновению и распространению пожаров на аналогичных объектах. В том случае, когда такие данные отсутствуют, для их получения следует использовать известные методы экспертной оценки. Алгоритм доведен до компьютерной реализации и может найти применение в муниципальных противопожарных службах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 69-ФЗ «О пожарной безопасности» (с изменениями и дополнениями).
2. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (с изменениями и дополнениями).
3. ГОСТ Р 51901.10-2009/ISO/TS 16732:2005 Менеджмент риска. Процедуры управления пожарным риском на предприятии.
4. СНиП 21-01-97* Пожарная безопасность зданий и сооружений (с изменениями № 1, 2).
5. Теличенко В.И., Ройтман В.М., Слесарев М.Ю. и др. Основы комплексной безопасности строительства: монография. Под ред. В.И. Теличенко и В.М. Ройтмана. М.: Изд-во АСВ. 2011:168.
6. Теличенко В.И., Малыга Г.Г., Павлов А.С. Воздействие строительных объектов на окружающую среду: учебное пособие. М.: Архитектура-С. 2009:264.
7. Цховребов Э.С., Четвертаков Г.В., Шканов С.И. Экологическая безопасность в строительной индустрии. М.: Альфа-М. 2014:304.
8. Ройтман В.М., Самошин Д.А., Томин С.В. и др. Пожарная безопасность в строительстве: учебник в 2 ч. Ч.2: П46 Пожарная профилактика на объектах защиты; под общ. ред. Б.Б. Серкова. М: Академия ГПС МЧС России. 2016:480.
9. Беляев А.В., Демехин В.Н., Крейтор В.П. Пожарная безопасность в строительстве. Методические рекомендации по проверке соответствия архитектурно-строительных и инженерно-технических решений проектов зданий противопожарным требованиям строительных норм и правил. Под общ. ред. В.С. Артамонова. СПб: ИПС МЧС РФ. 2003:310.
10. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий. М.: ВНИИПО. 2006:93.
11. Малин А.С. Исследование систем управления. М.: ГУ ВШЭ. 2005:399.
12. Дынкин Е.Б., Юшкевич А.А. Теоремы и задачи о процессах Маркова. М.: Наука. 1967:231.

REFERENCES

1. Federal Law No. 69-FZ of December 21, 1994 "On Fire Safety" (as amended).
2. Federal Law No. 123-FZ of July 22, 2008 "Technical Regulations on fire safety requirements" (as amended).
3. GOST R 51901.10-2009 / ISO/TS 16732: 2005 Risk management. Fire risk management procedures at the enterprise.

4. SNiP 21-01-97 * Fire safety of buildings and structures (with Amendments N 1, 2).
5. Telichenko V.I., Roitman V.M., Slesarev M.Yu. et al. Fundamentals of complex construction safety: monograph; ed. by V.I. Telichenko and V.M. Roitman. Moscow: Publishing House of the DIA. 2011:168.
6. Telichenko V.I., Malykha G.G., Pavlov A.S. The impact of construction objects on the environment: a textbook. M.: Architecture-S. 2009:264.
7. Tskhovrebov E.S., Chetvertakov G.V., Shkanov S.I. Ecological safety in the construction industry. Moscow: Alfa-M. 2014:304.
8. Roitman V.M., Samoshin D.A., Tomin V. S. etc. Fire safety in construction: a tutorial in 2 hours. Part 2: П46 Fire prevention protection; under the General editorship of B.B. Serkova. M: Academy of state fire service of EMERCOM of Russia. 2016:480.
9. Belyaev A.C., Demekhin, V.N., Creator V.P. Of Fire safety in construction. Methodological recommendations for checking the compliance of architectural and construction and engineering solutions of building projects with the fire-fighting requirements of building codes and regulations. Under the general editorship of V.S. Artamonov. St. Petersburg: IGPS EMERCOM of the Russian Federation. 2003:310.
10. Guidelines for fire risk assessment for industrial enterprises. M.: VNIPO. 2006:93.
11. Malin A.S. The study of control systems. Moscow: Higher School of Economics. 2005:399.
12. Dynkin E.B., Yushkevich A.A. Theorems and problems about Markov processes. M.: Nauka. 1967:231.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фурсов Илья Вадимович, аспирант Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.
Pyа V. Fursov, post-graduate student of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.
e-mail: cva57@yandex.ru

Куприенко Павел Сергеевич, д. т. н., доцент, заведующий кафедрой техносферной и пожарной безопасности, Воронежский государственный технический университет.
Pavel S. Kuprienko, doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technosphere and Fire Safety of the Voronezh State Technical University
e-mail: cva57@yandex.ru