

Научная статья

УДК 629.331, 614.841; DOI: 10.61260/2218-130X-2023-4-16-25

МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ КАСКАДНОГО РАЗВИТИЯ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОЙ СИТУАЦИИ НА АВТОСТОЯНКЕ

✉Таранцев Александр Алексеевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия;

Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия.

Кожевин Дмитрий Федорович;

Поташев Дмитрий Анатольевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉t_54@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы, связанные с пожарами и взрывами газа в ограниченных строительных объемах, в частности, пожаров автомобилей на жидком топливе и взрывов газобаллонных автомобилей в подземных автостоянках и наземных автостоянках закрытого типа. Показано, что на таких автостоянках могут возникать различные нештатные ситуации каскадного характера – от пожаров одного или нескольких автомобилей до взрывов газобаллонных автомобилей как по причине разгерметизации газобаллонного оборудования, так и из-за тепловых потоков от соседних горящих автомобилей. Построена марковская цепь каскадного развития нештатной ситуации на автостоянке и получены количественные оценки вероятностей соответствующих ситуаций.

Ключевые слова: автомобиль, автостоянка, пожар, взрыв, каскадный процесс

Для цитирования: Таранцев А.А., Кожевин Д.Ф., Поташев Д.А. Марковская модель каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации на автостоянке // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2023. № 4. С. 16–25. DOI: 10.61260/2218-130X-2023-4-16-25.

Scientific article

THE MARKOV MODEL OF CASCADE DEVELOPMENT IN THE FIRE AND EXPLOSIVE SITUATION IN PARKING LOT

✉Tarantsev Alexander A.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia;

N.S. Solomenko institute of transport problems of the Russian academy of sciences,
Saint-Petersburg, Russia.

Kozhevin Dmitry F.;

Potashev Dmitry A.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉t_54@mail.ru

Abstract. The article deals with issues related to fires and gas explosions in limited construction volumes, in particular, fires of liquid-fueled cars and explosions of gas-cylinder cars in underground parking lots and ground parking lots of a closed type. It is shown that various emergency situations of a cascading nature can occur in such parking lots – from fires of one or several cars to explosions of gas-cylinder cars both due to depressurization of gas-cylinder equipment and due to heat flows from neighboring burning cars. A Markov chain of cascading development of an emergency situation in a parking lot is constructed and quantitative estimates of the probabilities of the corresponding situations are obtained.

Keywords: car, parking lot, fire, explosion, cascade process

For citation: Tarantsev A.A., Kozhevnikov D.F., Potashev D.A. The markov model of cascade development in the fire and explosive situation in parking lot // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2023. № 4. P. 16–25. DOI: 10.61260/2218-130X-2023-4-16-25.

Введение

Актуальность статьи обусловлена следующими обстоятельствами. Во-первых, ростом количества автомобилей как в абсолютном исчислении, так и на душу населения. Например, по данным Росстата [1] в Российской Федерации лидерами по числу легковых автомобилей являются – Москва (~3,6 млн) и Санкт-Петербург (~1,7 млн), а в целом по стране показатель N_T (количество легковых автомобилей на 1 000 чел.) порядка 350. Мировые лидеры по этому показателю – Сан-Марино ($N_T=1263$), Монако ($N_T=899$) и США ($N_T=799$).

Во-вторых, большой стоимостью участков земли в крупных городах, что приводит к необходимости строительства многоэтажных надземных и подземных автостоянок [2, 3] (табл. 1) как отдельно стоящих, так встроенных в здания (рис. 1).

Таблица 1

Встроенные многоуровневые подземные автостоянки в городах Российской Федерации

Город	Адрес	Количество эт. / мест
Москва	Новый Арбат, д. 32, МФК «Новый Арбат, 32»	4 эт. / 590 мест
Санкт-Петербург	Лиговский просп., д. 30, ТРЦ «Галерея»	2 эт. / 1200 мест
	Набережная реки Мойки, д. 75–79	2 эт. / 75 мест
Новосибирск	Ул. Военная, д. 5, ТРЦ «Аура»	2 эт. / 300 мест
Екатеринбург	Ул. Энтузиастов, 36 Б, ЖК «Демидовский»	2 эт. / 256 мест
Нижний Новгород	Наб. Верхне-Волжская, д. 10, ЖК «Royal Landmark»	2 эт. / 80 мест
Красноярск	Ул. Мичурина, ЖК «Коломенские высоты»	2 эт. / 336 мест
Челябинск	Ул. Героя России Яковлева, д. 15 а, ЖК «Манхэттен»	2 эт. / 288 мест
Уфа	Проспект Октября, д. 107а, ЖК «Идель Тауэр»	3 эт. / 600 мест
Ростов-на-Дону	Ул. Ленина, д. 46 б, ЖК «Белый Ангел»	2 эт. / 432 места
Хабаровск	Ул. Фрунзе, д. 87, ЖК «Графит»	2 эт. / 38 мест
Владивосток	Ул. Фастовская, д. 50, ЖК «Элемент»	3 эт. / 75 мест

Примечание: введенные в эксплуатацию по данным на 2020 г.

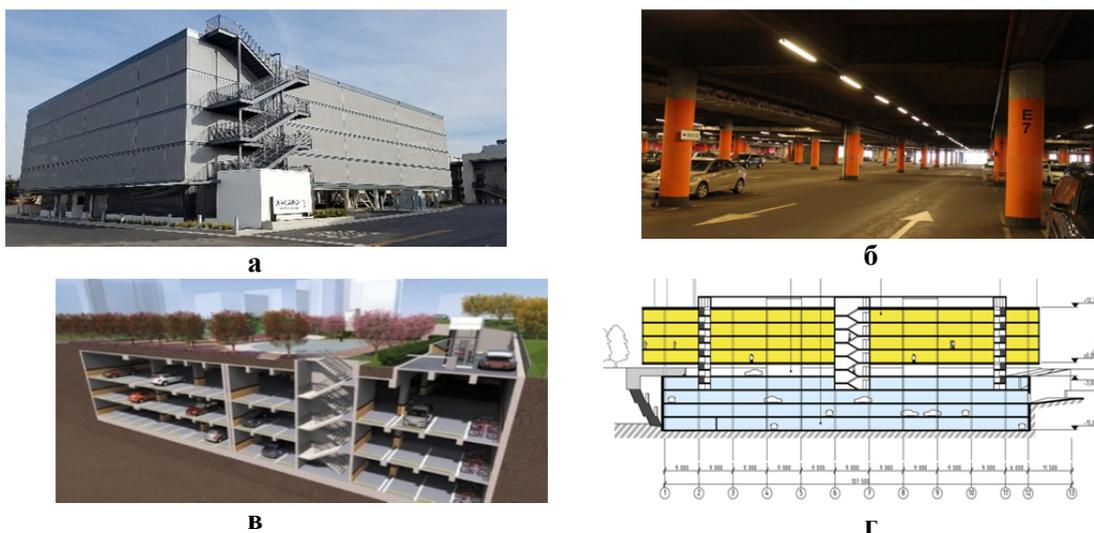


Рис. 1. Автостоянки закрытого типа: а – наземная многоуровневая; б – встроенная полузакрытая наземная одноуровневая; в – отдельно стоящая подземная многоуровневая; г – проект многоуровневой подземной автостоянки, встроенной в офисный центр (фото из открытого доступа в интернете)

В-третьих, появлением всё большего количества газобаллонных автомобилей (ГБА), использующих газ в качестве топлива (рис. 2). Например, по прогнозам немецкого института исследований автомобильного рынка CAR число ГБА в ЕС к 2025 г. может достигнуть 17 млн, что составит 5,6 % от общего числа автомобилей.



Рис. 2. Газобаллонные автомобили: а – полностью газобаллонный; б – газовый баллон в багажнике автомобиля с комбинированным двигателем внутреннего сгорания (ДВС)

В-четвёртых, учитывая пожароопасность автомобилей на жидком топливе [4] и особенно взрывоопасность ГБА [5], а также каскадный характер развития пожаровзрывоопасной ситуации в подземной автостоянке [6]. Например, пожар автомобиля с бензиновым ДВС может вызвать как пожар соседних автомобилей, так и взрыв стоящего рядом ГБА, с другой стороны, взрыв ГБА может как уничтожить этот ГБА, так и повредить соседние автомобили с бензиновыми ДВС, спровоцировав их возгорание.

Таким образом, моделирование каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации в подземных автостоянках представляется актуальным.

Методы исследования

Моделирование каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации в подземных автостоянках целесообразно проводить с использованием математического аппарата теории марковских цепей [7, 8]. Ситуация на автостоянке может быть условно описана несколькими состояниями $\{S\}$, например, $S_1 \div S_{10}$ (табл. 2), граф переходов для которых приведен на рис. 3.

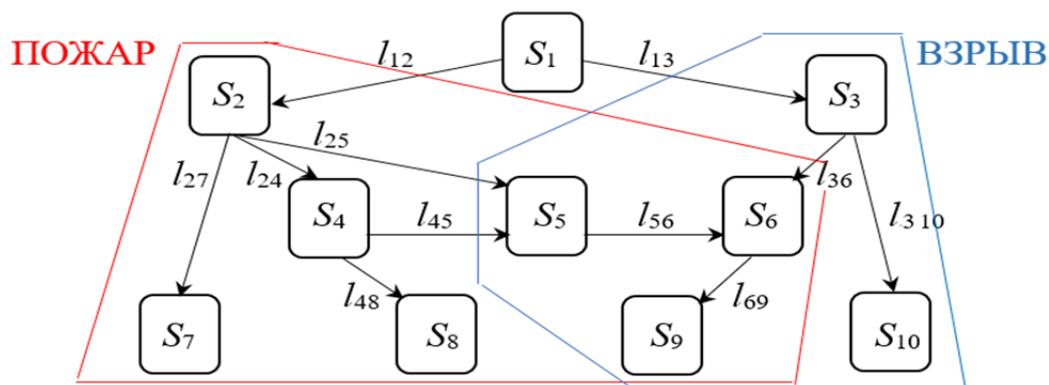


Рис. 3. Граф переходов для состояний автостоянки с автомобилями с ДВС на жидком топливе и с ГБА (I_{ij} – «веса» дуг – вероятности или интенсивности переходов)

Таблица 2

Состояния автостоянки при каскадном развитии пожаровзрывоопасной ситуации

S_i	Состояние	P_i	Примечание
S_1	Автостоянка работает в штатном режиме	P_1	–
S_2	Возгорание автомобиля с ДВС на жидком топливе	P_2	Пожар
S_3	Взрыв ГБА из-за неисправности или внешнего воздействия	P_3	Взрыв
S_4	Горение нескольких автомобилей с ДВС на жидком топливе	P_4	Пожар
S_5	Взрыв ГБА из-за нагрева от горящего соседнего автомобиля	P_5	Пожар→взрыв
S_6	Горение нескольких автомобилей из-за взрыва ГБА	P_6	Взрыв→пожар
S_7	Пожар незначительный, потушен АУП, ущерб небольшой	P_7	Последствия
S_8	Пожар ликвидируется несколькими расчётами, ущерб средний	P_8	
S_9	Пожар по повышенному номеру, есть обрушения вследствие взрыва, требуется проведение АСР и привлечение экстренных служб города. Ущерб крупный	P_9	
S_{10}	Повреждение автомобилей из-за взрыва ГБА, пожара нет. Требуется проведение АСР, ущерб значительный	P_{10}	

АУП – автоматическая установка пожаротушения; АСР – аварийно-спасательные работы

Очевидно, состояния $S_7 \div S_{10}$ являются поглощающими (дуги графа только входят в них, а из них не выходят) и описывающими негативные последствия – от небольшого ущерба при пожаре одного автомобиля с бензиновым ДВС, когда потребуется только косметический ремонт автостоянки, до крупного и значительного, когда произошёл взрыв ГБА, и возможны повреждения несущих конструкций [9].

Задача определения конечных (установившихся) состояний $\{S\}$ автостоянки после завершения на ней каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации сводится к следующему. По данным о количественных значениях «весов» $\{l_{ij}\}$ и начальных вероятностей $\{P^0\}$ состояний (как правило, $P_1^0=1, P_2^0=\dots=P_{10}^0=0$) требуется найти конечные вероятности $\{P^r\}$ (прежде всего $P_7^r \div P_{10}^r$) и сделать вывод о достаточности или недостаточности мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасности автостоянки.

Решение данной задачи возможно двумя способами, когда в марковской цепи (рис. 3) происходит процесс с дискретным или непрерывным временем. В первом случае «веса» $\{l_{ij}\}$ представляются в виде вероятностей переходов $\{p_{ij}\}$, во втором – в виде интенсивностей переходов $\{\lambda_{ij}\}$. Численные величины $\{p_{ij}\}$ или $\{\lambda_{ij}\}$ могут быть определены статистически или экспертными методами.

Для процесса с дискретным временем по вероятностям $\{p_{ij}\}$ составляется матрица переходов P , которая применительно к графу на рис. 3 приведена в табл. 3. Особенность матрицы P в том, что сумма вероятностей в строках =1.

Таблица 3

Матрица вероятностей переходов P применительно к графу на рис. 3

$\{S\}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$1-p_{12}-p_{13}$	p_{12}	p_{13}	0	0	0	0	0	0	0
2	0	$1-p_{24}-p_{25}-p_{27}$	0	p_{24}	p_{25}	0	p_{27}	0	0	0
3	0	0	$1-p_{36}-p_{310}$	0	0	p_{36}	0	0	0	p_{310}
4	0	0	0	$1-p_{45}-p_{48}$	p_{45}	0	0	p_{48}	0	0
5	0	0	0	0	$1-p_{56}$	p_{56}	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	$1-p_{69}$	0	0	p_{69}	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Используя матрицу P и следуя пошаговому алгоритму, приведённому, например, в работе [7], можно от начальных вероятностей $\{P^0\}$ состояний автостоянки перейти к искомым конечным вероятностям $\{P^r\}$. Данный алгоритм реализован в виде компьютерной программы, полученные с его помощью результаты приведены в работе [10]. Важно отметить, что для оценки вероятностей $P_7^k \div P_{10}^k$ конечных состояний были получены аналитические выражения:

$$\begin{cases} P_7^k = \frac{1}{(1+q_1)(1+q_2+q_3)}, \\ P_8^k = \frac{q_2}{(1+q_1)(1+q_4)(1+q_2+q_3)}, \\ P_{10}^k = \frac{q_1}{(1+q_1)(1+q_5)}, \\ P_9^k = 1 - P_7^k - P_8^k - P_{10}^k, \end{cases} \quad (1)$$

где $q_1 = \frac{p_{13}}{p_{12}}$, $q_2 = \frac{p_{24}}{p_{27}}$, $q_3 = \frac{p_{25}}{p_{27}}$, $q_4 = \frac{p_{45}}{p_{48}}$, $q_5 = \frac{p_{36}}{p_{310}}$.

Это означает, что вместо девяти вероятностей переходов p_{12} , p_{13} , p_{24} , p_{25} , p_{27} , p_{36} , p_{45} , p_{48} и p_{310} можно использовать всего пять их соотношений $q_1 \div q_5$, что значительно облегчает решение прикладных задач.

Для процесса с непрерывным временем по интенсивностям $\{\lambda_{ij}\}$ с использованием метода А.Н. Колмогорова [11, 12]. Это позволяет описать динамику вероятностей $\{P\}$ состояний в виде системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка. Применительно к графу на рис. 3 такая система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1, \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{24} + \lambda_{25} + \lambda_{27})P_2, \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_{13}P_1 - (\lambda_{36} + \lambda_{310})P_3, \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_{24}P_2 - (\lambda_{45} + \lambda_{48})P_4, \\ \frac{dP_5}{dt} = \lambda_{25}P_2 + \lambda_{45}P_4 - \lambda_{56}P_5, \\ \frac{dP_6}{dt} = \lambda_{36}P_3 + \lambda_{56}P_5 - \lambda_{69}P_6, \\ \frac{dP_7}{dt} = \lambda_{27}P_2, \\ \frac{dP_8}{dt} = \lambda_{48}P_4, \\ \frac{dP_9}{dt} = \lambda_{69}P_6, \\ \frac{dP_{10}}{dt} = \lambda_{310}P_3. \end{cases} \quad (2)$$

Было получено решение системы уравнений (2) при начальных условиях $P_1(0)=1$, $P_2(0)=\dots=P_{10}(0)=0$, которое для основных искомым вероятностей имеет вид:

$$\begin{cases} P_1(t) = \exp(-\Lambda_1 t), \\ \dots \\ P_7(t) = \frac{\lambda_{12}\lambda_{27}}{\Lambda_1\Lambda_2} \left[1 - \frac{\Lambda_2 \exp(-\Lambda_1 t) - \Lambda_1 \exp(-\Lambda_2 t)}{\Lambda_2 - \Lambda_1} \right], \\ P_8(t) = \lambda_{12}\lambda_{24}\lambda_{48}(K_1 + K_2 + K_3), \\ P_9(t) = 1 - P_7(t) - P_8(t) - P_{10}(t), \\ P_{10}(t) = \frac{\lambda_{13}\lambda_{310}}{\Lambda_1\Lambda_3} \left[1 - \frac{\Lambda_3 \exp(-\Lambda_1 t) - \Lambda_1 \exp(-\Lambda_3 t)}{\Lambda_3 - \Lambda_1} \right], \end{cases} \quad (3)$$

где $\Lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{13}$, $\Lambda_2 = \lambda_{24} + \lambda_{25} + \lambda_{27}$, $\Lambda_3 = \lambda_{36} + \lambda_{3\ 10}$, $\Lambda_4 = \lambda_{45} + \lambda_{48}$;
 $K_1 = \frac{1 - \exp(-\Lambda_1 t)}{\Lambda_1(\Lambda_2 - \Lambda_1)(\Lambda_4 - \Lambda_1)}$, $K_2 = \frac{1 - \exp(-\Lambda_2 t)}{\Lambda_2(\Lambda_2 - \Lambda_1)(\Lambda_4 - \Lambda_2)}$, $K_3 = \frac{1 - \exp(-\Lambda_4 t)}{\Lambda_4(\Lambda_4 - \Lambda_1)(\Lambda_4 - \Lambda_2)}$.

Но поскольку практический интерес представляют только конечные вероятности $P_7^k \div P_{10}^k$ при $t \rightarrow \infty$, из выражения (3), с учётом алгебраических преобразований, получаем:

$$\begin{cases} P_7(\infty) = P_7^k = \frac{\lambda_{12}\lambda_{27}}{\Lambda_1\Lambda_2} = \frac{1}{(1+\rho_1)(1+\rho_2+\rho_3)}, \\ P_8(\infty) = P_8^k = \frac{\lambda_{12}\lambda_{24}\lambda_{48}}{\Lambda_1\Lambda_2\Lambda_4} = \frac{\rho_2}{(1+\rho_1)(1+\rho_4)(1+\rho_2+\rho_3)}, \\ P_{10}(\infty) = P_{10}^k = \frac{\lambda_{13}\lambda_{3\ 10}}{\Lambda_1\Lambda_3} = \frac{\rho_1}{(1+\rho_1)(1+\rho_5)}, \\ P_9(\infty) = P_9^k = 1 - P_7^k - P_8^k - P_{10}^k, \end{cases} \quad (4)$$

где $\rho_1 = \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{12}}$, $\rho_2 = \frac{\lambda_{24}}{\lambda_{27}}$, $\rho_3 = \frac{\lambda_{25}}{\lambda_{27}}$, $\rho_4 = \frac{\lambda_{45}}{\lambda_{48}}$, $\rho_5 = \frac{\lambda_{36}}{\lambda_{3\ 10}}$.

Нетрудно видеть, что правые части уравнения (4) аналогичны выражениям (1) для процессов с дискретным временем, что является дополнительным подтверждением правильности подхода. Также вместо девяти интенсивностей переходов λ_{12} , λ_{13} , λ_{24} , λ_{25} , λ_{27} , λ_{36} , λ_{45} , λ_{48} и $\lambda_{3\ 10}$ можно использовать всего пять их соотношений $\rho_1 \div \rho_5$, что значительно облегчает решение прикладных задач.

Результаты исследования и обсуждение

Поясним изложенный подход на примерах. Пусть для процесса с дискретным временем, соответствующего графу на рис. 3, известны, например, следующие вероятности переходов: $p_{12}=0,01$; $p_{13}=0,02$; $p_{24}=0,03$; $p_{25}=0,04$; $p_{27}=0,05$; $p_{36}=0,06$; $p_{3-10}=0,07$; $p_{45}=0,08$; $p_{48}=0,09$; $p_{56}=0,10$; $p_{69}=0,11$. Тогда матрица переходов **P** принимает вид:

$$P = \begin{bmatrix} 0,97 & 0,01 & 0,02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,88 & 0 & 0,03 & 0,04 & 0 & 0,05 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,87 & 0 & 0 & 0,06 & 0 & 0 & 0 & 0,07 \\ 0 & 0 & 0 & 0,83 & 0,08 & 0 & 0 & 0,09 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,90 & 0,10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,89 & 0 & 0 & 0,11 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,00 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,00 \end{bmatrix}.$$

Проведя пошаговые вычисления вероятностей $\{P\}$ в соответствии с алгоритмом [7] с учётом вышеуказанных начальных условий, получаем динамику процесса с дискретным временем каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации на автостоянке, который стабилизировался к 325 шагу. Результаты расчёта приведены в табл. 4.

Из табл. 4 следует, что при заданных вероятностях переходов $\{p_{ij}\}$ вероятность P_1 штатного режима работы автостоянки убывает экспоненциально, а итоговые вероятности небольшого, среднего, крупного и значительного ущерба равны соответственно $P_7^k=0,1389$, $P_8^k=0,0441$, $P_9^k=0,4580$, $P_{10}^k=0,3590$. Аналогичный результат получается и при использовании аналитических выражений (1):

$$\begin{cases} P_7^K = \frac{1}{\left(1 + \frac{0,02}{0,01}\right)\left(1 + \frac{0,03+0,04}{0,05+0,05}\right)} = 0,1389, \\ P_8^K = \frac{\frac{0,03}{0,05}}{\left(1 + \frac{0,02}{0,01}\right)\left(1 + \frac{0,08}{0,09}\right)\left(1 + \frac{0,03+0,04}{0,05+0,05}\right)} = 0,0441, \\ P_{10}^K = \frac{\frac{0,02}{0,01}}{\left(1 + \frac{0,02}{0,01}\right)\left(1 + \frac{0,06}{0,07}\right)} = 0,3590, \\ P_9^K = 1 - 0,1389 - 0,0441 - 0,3590 = 0,4580. \end{cases}$$

Таким образом, при каскадном развитии пожаровзрывоопасной ситуации на автостоянке при заданных вероятностях переходов следует ожидать крупный или значительный ущерб.

Таблица 4

Динамика вероятностей состояния автостоянки при каскадном развитии пожаровзрывоопасной ситуации

k	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
0	1.000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
1	.9700	.0100	.0200	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
2	.9409	.0185	.0368	.0003	.0004	.0012	.0005	.0000	.0000	.0014
3	.9127	.0257	.0508	.0008	.0011	.0033	.0014	.0000	.0001	.0040
4	.8853	.0317	.0625	.0014	.0021	.0061	.0027	.0001	.0005	.0075
5	.8587	.0368	.0721	.0021	.0033	.0094	.0043	.0002	.0012	.0119
6	.8330	.0410	.0799	.0029	.0046	.0130	.0061	.0004	.0022	.0170
7	.8080	.0444	.0861	.0036	.0060	.0168	.0082	.0007	.0036	.0225
8	.7837	.0471	.0911	.0043	.0075	.0208	.0104	.0010	.0055	.0286
9	.7602	.0493	.0949	.0050	.0090	.0247	.0128	.0014	.0078	.0350
10	.7374	.0510	.0978	.0056	.0104	.0286	.0152	.0018	.0105	.0416
20	.5438	.0518	.0964	.0088	.0216	.0573	.0418	.0086	.0581	.1118
40	.2957	.0322	.0584	.0067	.0219	.0598	.0844	.0233	.1963	.2214
60	.1608	.0178	.0321	.0038	.0139	.0392	.1091	.0327	.3067	.2840
80	.0874	.0097	.0175	.0021	.0078	.0225	.1227	.0379	.3742	.3182
100	.0476	.0053	.0095	.0011	.0043	.0125	.1301	.0407	.4122	.3368
125	.0222	.0025	.0044	.0005	.0020	.0058	.1348	.0425	.4366	.3486
150	.0104	.0012	.0021	.0002	.0009	.0027	.1370	.0434	.4480	.3541
200	.0023	.0003	.0005	.0001	.0002	.0006	.1385	.0440	.4558	.3579
250	.0005	.0001	.0001	.0000	.0000	.0001	.1388	.0441	.4576	.3588
300	.0001	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.1389	.0441	.4579	.3589
325	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.1389	.0441	.4580	.3590

Примечание: k – номер шага

Пусть для процесса с непрерывным временем, соответствующему графу на рис. 3, известны следующие интенсивности переходов: $\lambda_{12}=0,01$; $\lambda_{13}=0,02$; $\lambda_{24}=0,03$; $\lambda_{25}=0,04$; $\lambda_{27}=0,05$; $\lambda_{36}=0,06$; $\lambda_{3-10}=0,07$; $\lambda_{45}=0,08$; $\lambda_{48}=0,09$; $\lambda_{56}=0,10$; $\lambda_{69}=0,11$, которые, как и для процесса с дискретным временем, заданы условно.

Для установившегося процесса каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации конечные вероятности $P_7^K \div P_{10}^K$ найдём из выражения (4):

$$\begin{cases} P_7^K = \frac{0,01 \cdot 0,05}{(0,01+0,02)(0,03+0,04+0,05)} = 0,1389, \\ P_8^K = \frac{0,01 \cdot 0,03 \cdot 0,09}{(0,01+0,02)(0,03+0,04+0,05)(0,08+0,09)} = 0,0441, \\ P_{10}^K = \frac{0,02 \cdot 0,07}{(0,01+0,02)(0,06+0,07)} = 0,3590, \\ P_9^K = 1 - 0,1389 - 0,0441 - 0,3590 = 0,4580 \end{cases}$$

или с использованием соотношений $\{\rho\}$:

$$\begin{cases} P_7^K = \frac{1}{(1+2)(1+0,6+0,8)} = 0,1389, \\ P_8^K = \frac{0,6}{(1+2)(1+0,8889)(1+0,6+0,8)} = 0,0441, \\ P_{10}^K = \frac{2}{(1+2)(1+0,8571)} = 0,3590, \\ P_9^K = 1 - 0,1389 - 0,0441 - 0,3590 = 0,4580. \end{cases}$$

Нетрудно видеть, что данные результаты согласуются с результатом для процесса с дискретным временем каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации на автостоянке, что подтверждает объективность метода.

Выводы

Таким образом, в данной работе показаны тенденции, связанные с интенсивным строительством подземных автостоянок и ростом количества ГБА. Учитывая пожароопасность автомобилей с ДВС на жидком топливе и взрывоопасность ГБА, обоснована актуальность исследования процесса каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации на подземной автостоянке, если там будут находиться автомобили указанных типов.

Показана возможность описания процесса каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации на автостоянке с использованием цепи Маркова как с дискретным, так и с непрерывным временем и получены взаимосогласующиеся аналитические и численные результаты. Также показана возможность сокращения учитываемого числа вероятностей переходов для процессов с дискретным временем и интенсивностей переходов для процессов с непрерывным временем за счёт использования соотношений вероятностей (интенсивностей) переходов.

В дальнейшем представляется целесообразным провести исследование в части создания методики объективного задания вероятностей и интенсивностей переходов и управления этими параметрами в интересах минимизации ущерба на автостоянке при возможности возникновения каскадно развивающейся пожаровзрывоопасной ситуации.

Список источников

1. Обеспеченность автомобилями в крупнейших городах России. ТОП-20. URL: <https://www.autostat.ru/press-releases/46332/> (дата обращения: 30.03.2021).
2. Об утверждении СП 113.13330.2016 «СНиП 21-02–99. Стоянки автомобилей»: приказ Минстроя России от 7 нояб. 2016 г. № 776/пр (в ред. от 17 сент. 2019 г.). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. Мангушев Р.А., Осокин А.И., Левинская П.Г. Перспективы устройства подземных паркингов в условиях стесненной застройки исторического центра Санкт-Петербурга // Жилищное строительство. 2019. № 4. С. 3–18. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-4-3-18.
4. Таранцев А.А., Сытдыков М.Р., Поташев Д.А. О пожароопасности некоторых типов автомобилей // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2021. № 1. С. 1–8. DOI: 10.24412/2218-130X-2021-1-1-8.

5. Проблема взрывопожарной опасности подземных автостоянок и ее возможное решение / Л.Т. Танклевский [и др.] // Журнал «XXI век: итоги прошлого проблемы настоящего плюс». 2022. Т. 11. № 4 (60). С. 225–232. DOI: 10.46548/21vek-2022-1160-035.
6. О моделировании каскадного развития чрезвычайных ситуаций при пожарах на подземных автостоянках / А.А. Таранцев [и др.] // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. №3 (67). С. 131–140. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-131-140.
7. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 552 с.
8. Бутырский Е.Ю., Матвеев А.В. Математическое моделирование систем и процессов. СПб.: Информ. изд. учеб.-науч. центр «Стратегия будущего», 2022. 733 с. DOI: 10.37468/book_011222. EDN: CCRIRT.
9. Поташев Д.А. Об опасности взрывов газа в замкнутых строительных объёмах // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2023. № 2. С. 181–186.
10. Танклевский Л.Т., Зыбина О.А., Таранцев А.А. Применение марковских цепей к задачам поддержания готовности организационных и технических систем // XXI век: итоги прошлого проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 2 (62). С. 26–34. EDN: NUZAGG.
11. Колмогоров А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1986. 534 с.
12. Матвеев А.В. Методы моделирования и прогнозирования. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2022. 230 с. EDN: IMLKWS.

References

1. Obespechennost' avtomobilyami v krupnejshih gorodah Rossii. TOP-20. URL: <https://www.autostat.ru/press-releases/46332/> (data obrashcheniya: 30.03.2021).
2. Ob utverzhdenii SP 113.13330.2016 «SNiP 21-02–99. Stoyanki avtomobilej»: prikaz Ministroya Rossii ot 7 noyab. 2016 g. № 776/pr (v red. ot 17 sent. 2019 g.). Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».
3. Mangushev R.A., Osokin A.I., Levinskaya P.G. Perspektivy ustrojstva podzemnyh parkingov v usloviyah stesnennoj zastroyki istoricheskogo centra Sankt-Peterburga // Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2019. № 4. S. 3–18. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-4-3-18.
4. Tarancev A.A., Sytdykov M.R., Potashev D.A. O pozharoopasnosti nekotoryh tipov avtomobilej // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2021. № 1. S. 1–8. DOI: 10.24412/2218-130H-2021-1-1-8.
5. Problema vzryvopozharnoj opasnosti podzemnyh avtostoyanok i ee vozmozhnoe reshenie / L.T. Tanklevskij [i dr.] // XXI vek: itogi proshlogo problemy nastoyashchego plyus. 2022. Т. 11. № 4 (60). S. 225–232. DOI: 10.46548/21vek-2022-1160-035.
6. O modelirovanii kaskadnogo razvitiya chrezvychajnyh situacij pri pozharah na podzemnyh avtostoyankah / A.A. Tarancev [i dr.] // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. №3 (67). С. 131–140. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-131-140.
7. Ventcel' E.S. Issledovanie operacij. M.: Sovetskoe radio, 1972. 552 s.
8. Butyrskij E.Yu., Matveev A.V. Matematicheskoe modelirovanie sistem i processov. SPb.: Inform. izd. ucheb.-nauch. centr «Strategiya budushchego», 2022. 733 s. DOI: 10.37468/book_011222. EDN: CCRIRT.
9. Potashev D.A. Ob opasnosti vzryvov gaza v zamknutyh stroitel'nyh ob'yomah // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2023. № 2. S. 181–186.
10. Tanklevskij L.T., Zybina O.A., Tarancev A.A. Primenenie markovskih cepej k zadacham podderzhaniya gotovnosti organizacionnyh i tekhnicheskikh sistem // XXI vek: itogi proshlogo problemy nastoyashchego plyus. 2023. Т. 12. № 2 (62). S. 26–34. EDN: NUZAGG.
11. Kolmogorov A.N. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika. M.: Nauka, 1986. 534 s.
12. Matveev A.V. Metody modelirovaniya i prognozirovaniya. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2022. 230 s. EDN: IMLKWS.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 23.11.2023; одобрена после рецензирования: 10.12.2023;
принята к публикации: 13.12.2023

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 23.11.2023; approved after review: 10.12.2023;
accepted for publication: 13.12.2023

Сведения об авторах:

Таранцев Александр Алексеевич, заведующий лабораторией проблем безопасности транспортных систем Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (199178, Санкт-Петербург, 12-я Линия ВО, д. 13); профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: t_54@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1561-2483>, SPIN-код: 1076-8133

Кожевин Дмитрий Федорович, начальник кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: Yagmort_KDF@mail.ru, SPIN-код: 9647-7196

Поташев Дмитрий Анатольевич, старший преподаватель-методист отделения инновационных проектов и программ института развития Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: dim-po@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2190-399X>, SPIN-код: 7346-2221

Information about authors:

Tarantsev Alexander A., head of the laboratory of safety problems of transport systems, Institute of transport problems named after. N.S. Solomenko Russian academy of sciences (199178, Saint-Petersburg, 12th Line VO, no. 13); professor of the department of fire extinguishing organization and carrying out emergency rescue operations of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, Professor, e-mail: t_54@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1561-2483>, SPIN: 1076-8133

Kozhevnikov Dmitriy F., chief of the physical and chemical bases of the burning and extinguishing processes department of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovskiy ave., 149), candidate of technical sciences, e-mail: Yagmort_KDF@mail.ru, SPIN: 9647-7196

Potashev Dmitry A., senior lecturer-methodologist of the department of innovative projects and programs of the development institute of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: dim-po@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2190-399X>, SPIN: 7346-2221