

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 614.841.2.001.5

Моделирование высокотемпературного воздействия пожара на остекление оконных проемов зданий перемещающимся источником

А.А. Лазарев¹, И.Ю. Федотов², Р.Н. Андреев³

Александр Александрович Лазарев

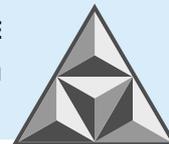
¹Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Иваново, Российская Федерация
kgn@edufire37.ru

Илья Юрьевич Федотов

²Главное управление МЧС России по Липецкой области, Липецк, Российская Федерация
newspacehorizons@gmail.com

Роман Николаевич Андреев

³Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Российская Федерация,
spsch-no@yandex.ru

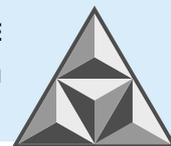


В статье представлена методика оценки высокотемпературного воздействия пожара на остекление оконных проемов зданий перемещающимся источником теплоты. Рассмотрены вопросы высокотемпературного воздействия на остекление с внешней стороны здания при пожаре в целях обеспечения пожарной безопасности и выбора решений по защите фасада. Проведен численный эксперимент по определению предельных вероятностей для системы оконных проемов.

Ключевые слова: оконный проем, марковский процесс, графы состояний, пожарная безопасность

Для цитирования:

Лазарев А.А., Федотов И.Ю., Андреев Р.Н. Моделирование высокотемпературного воздействия пожара на остекление оконных проемов зданий перемещающимся источником теплоты // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 8-17.
URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023



SCIENTIFIC ARTICLE

Modelling of the high-temperature effects of fire on glazing of building embrasures using a moving heat source

A.A. Lazarev¹, I.Yu. Fedotov², R.N. Andreev³

Alexander A. Lazarev

¹Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Ivanovo, Russia
kgn@edufire37.ru

Ilya Yu. Fedotov

²Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters in the Lipetsk region, Russia
newspacehorizons@gmail.com

Roman N. Andreev

³Academy of the State Emergency Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia
spsch-no@yandex.ru

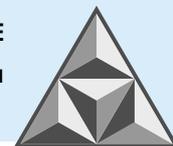


This article discusses the methodology for assessing the high-temperature impact of fire on the glazing of building embrasures using a moving heat source. The article also considers issues of high-temperature impact on glazing from the outside of the building in order to ensure the facades fire safety and selection of protection against fire. The researchers performed a numerical experiment to determine the limiting probabilities for the system of building embrasures.

Key words: glazing of building embrasures, Markov process, state graphs, fire safety

For citation:

Lazarev A.A., Fedotov I.Yu., Andreev R.N. (2023) Modeling of the high-temperature effects of fire on glazing of building embrasures using a moving heat source, *Smart Composite in Construction*, 4(2), pp. 8-17 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023



ВВЕДЕНИЕ

Пожары с внешней стороны многоквартирных жилых домов и объектов высокоэтажного строительства распространяются на вышестоящие этажи, как правило, по фасаду. При этом происходит частичное или полное разрушение остекления окон помещений, лоджий, балконов. Этому во многом способствует то, что на балконах и лоджиях часто сосредоточена большая пожарная нагрузка, способствующая достижению высокой температуры в процессе пожара и перехода пламени через оконные проемы.

Распространение пламени в некоторых случаях может проходить случайно – как вверх (рис. 1), так и вбок, в зависимости от расстояния между окнами, направления ветра, формы разрушения остекления и иных факторов.



Рис. 1. Пример распространения пламени по фасаду МКД

Fig. 1. Example of flame spreading on the facade of the apartment residential buildings

Гораздо реже происходит распространение пламени на нижележащие этажи (относительно очага пожара) в результате падения горящих обломков вниз. В табл. 1 приведены сведения о пожарах в Липецкой области в период 2018–2022 годов.

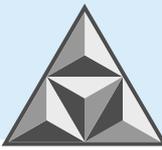
Таблица 1. Статистика пожаров в многоквартирных жилых домах на территории Липецкой области

Table 1. Statistics on fires in multi-apartment residential buildings in the Lipetsk region

Показатель	2018	2019	2020	2021	2022
Количество пожаров	144	214	230	209	236
Прямой материальный ущерб	18 326 500	12 347 450	16 700 116	23 224 503	25 705 000
Количество погибших	11	20	17	20	22

В настоящее время назрела необходимость разработки методов оценки высокотемпературного воздействия пожара на остекление оконных проемов зданий перемещающимся источником теплоты. Актуальность такой разработки продиктована необходимостью обеспечения пожарной безопасности с внешней стороны здания, оптимизации условий по защите фасада при ограничении распространения пожара. Эта методика может быть использована при выборе строительных материалов для остекления окон и их исполнения. Данные решения будут способствовать не только обеспечению безопасности людей, но и уменьшению размера ущерба от пожара.

Оценивая надежность «одежды» автомобильных дорог, А.Н. Давыдов использовал марковский процесс в качестве вероятностного метода [1]. Р.Ш. Мисбаховым и В.Е. Мизоновым в составной области при фазовых переходах моделировалась теплопроводность [2]; Т.В. Любимовой определялась достоверность гидрогеологических прогнозов при использовании цепей Маркова [3].



Математический аппарат теории цепей Маркова при моделировании использовали В.Е. Мизонов, А.В. Митрофанов, Е.В. Басова, Е.А. Шуина в рамках теоретического исследования нелинейной теплопроводности в многослойной среде [4, 5].

О.С. Симонович, В.Л. Снежко и Д.В. Козлов использовали цепи Маркова для определения периодичности осуществления ремонтных работ на обследованных низконапорных грунтовых плотинах [6]. В.А. Огурцовым, Ю.В. Хохловой, А.П. Алешиной и А.М. Фатахетдиновым на основе теории цепей Маркова разработана математическая модель для создания сухих смесей для строительства [7].

Вместе с тем влияние высокотемпературного воздействия пожара на остекление оконных проемов зданий перемещающимся источником теплоты оказалось неизученным. Целью настоящей работы является разработка методики, адекватно учитывающей влияние указанного фактора.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является остекление оконных проемов зданий.

Предметом исследования является высокотемпературное воздействие пожара на остекление оконных проемов зданий перемещающимся источником теплоты.

Задачи исследования:

1. В рамках информационного моделирования разработать размеченные графы состояний системы контроля пожарной безопасности оконных проемов зданий.
2. С использованием правил составления уравнений Колмогорова получить систему дифференциальных уравнений с последующим ее интегрированием и учетом состояния в начальный момент времени.
3. Провести эксперимент по определению предельных вероятностей для системы контроля оконных проемов зданий.

Пусть в некоторой системе четырех окон (Т) осуществляется контроль пожарной безопасности оконных проемов зданий и происходит марковский случайный процесс с дискретными состояниями O_1, O_2, O_3, O_4 (рис. 2) В данном случае переходы системы из состояния в состояние наблюдаются в случайные моменты времени, осуществляются под воздействием пуассоновского потока событий с интенсивностью $I_{ij} = \text{const}$.

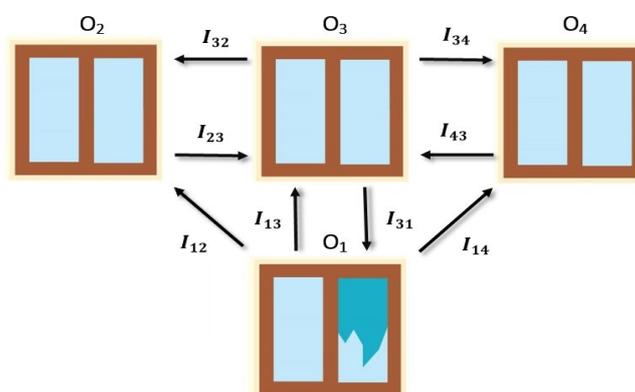
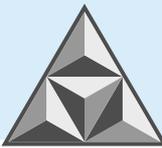


Рис. 2. Размеченный граф состояний системы Т

Fig. 2. Formatted graph of the T system states

Состояние O_1 характеризуется высокотемпературным воздействием пожара на остекление оконного проема здания перемещающимся источником теплоты на первом этаже. Состояние O_2 соответствует высокотемпературному воздействию пожара на остекление



первого оконного проема здания перемещающимся источником теплоты на втором этаже. При состоянии O_3 происходит высокотемпературное воздействие пожара на остекление центрального оконного проема здания перемещающимся источником теплоты на втором этаже. При состоянии O_4 происходит высокотемпературное воздействие пожара на остекление третьего оконного проема здания перемещающимся источником теплоты на втором этаже.

Для нахождения вероятностей состояний составляется система уравнений

$$\sum_{i=1}^n P_i I_{ij} = \sum_{i=1}^n P_j I_{ij}, \quad (j = 1, 2, \dots, n) [8],$$

где I_{ij} – интенсивность переходных потоков; P_i – вероятность состояния.

Система составляется по следующим правилам:

- число уравнений в «Т-образной» системе равно числу состояний; в нашем случае – четыре состояния высокотемпературного воздействия;
- каждое состояние $O_{(1-4)}$ соответствует уравнению с номером (1-4);
- в левой части каждого уравнения находится сумма интенсивностей I_{ij} (рис. 2, над стрелками) для всех стрелок, входящих в состояние O_j и умноженных на вероятности состояний, из которых выходят стрелки;
- в правой части уравнений находится сумма интенсивностей, выходящих из O_j стрелок; эта сумма умножается на вероятность P_j .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлен размеченный граф системы контроля пожарной безопасности при строительстве с заданными значениями интенсивности потока событий. Рассмотрим систему T_1 (рис. 3).

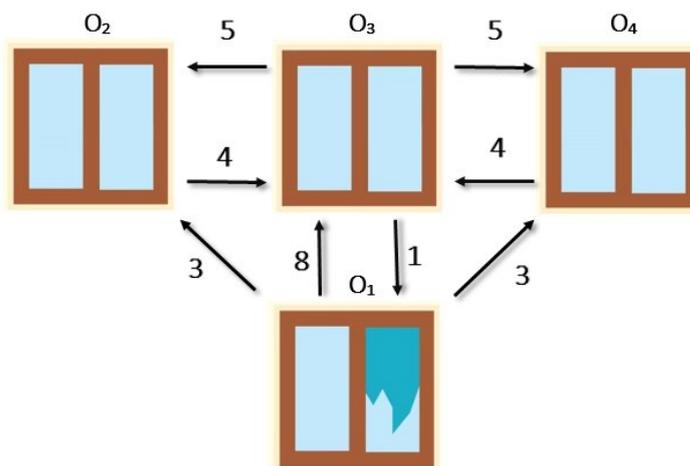
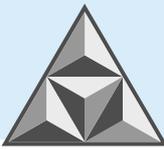


Рис. 3. Размеченный граф состояний системы T_1

Fig. 3. Formatted graph of the T_1 system states

Для системы T_1 система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} P_3 = 14P_1, \\ 3P_1 + 5P_3 = 4, \\ 8P_1 + 4P_2 + 4P_4 = 11P_3, \\ 3P_1 + 5P_3 = 4P_4 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} P_3 = 14P_1, \\ 3P_1 + 5P_3 = 4P_2, \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1, \\ 3P_1 + 5P_3 = 4P_4. \end{cases} \quad (1)$$



Однако система уравнений является вырожденной, и для нахождения единственного решения одно любое уравнение нужно заменить на условие нормировки $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1$. В нашем случае целесообразно заменить третье уравнение.

При решении данной системы получим предельные вероятности для системы T_1 : $P_1 = 0.02$; $P_2 = 0.35$; $P_3 = 0.28$; $P_4 = 0.35$.

Рассмотрим вариант контроля состояния пожарной безопасности объекта строительства. На рис. 4 представлена система T_2 с другими условиями.

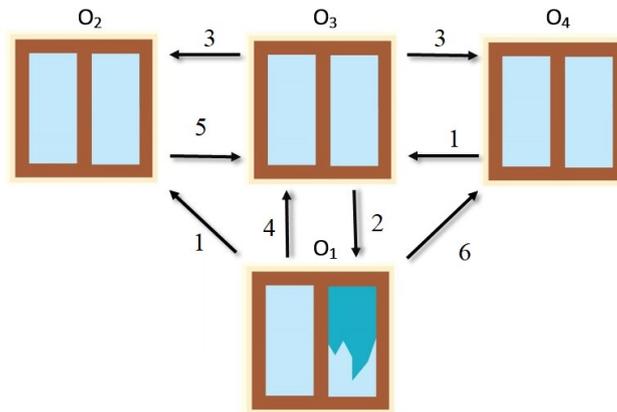


Рис. 4. Размеченный граф состояний системы T_2

Fig. 4. Formatted graph of the T_2 system states

Получим дифференциальные уравнения системы T_2 , которая будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} 2P_3 = 11P_1, \\ P_1 + 3P_3 = 5P_2, \\ 5P_2 + 4P_1 + P_4 = 8P_3, \\ 6P_1 + 3P_3 = P_4 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 2P_3 = 11P_1, \\ P_1 + 3P_3 = 5P_2, \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1, \\ 6P_1 + 3P_3 = P_4. \end{cases} \quad (2)$$

По итогам решения данной системы получим предельные вероятности для системы T_2 . Они будут равны: $P_1 = 0.03$; $P_2 = 0.10$; $P_3 = 0.16$; $P_4 = 0.71$.

Рассмотрим систему T_3 (рис. 5).

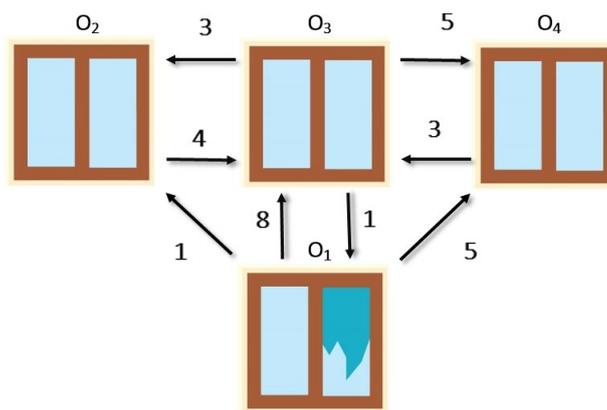
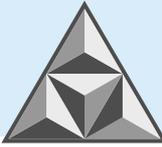


Рис. 5. Размеченный граф состояний системы T_3

Fig. 5. Formatted graph of the T_3 system states

$$\begin{cases} P_3 = 14P_1, \\ P_1 + 3P_3 = 4P_2, \\ 8P_1 + 4P_2 + 3P_4 = 9P_3, \\ 5P_1 + 5P_3 = 3P_4 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} P_3 = 14P_1, \\ P_1 + 3P_3 = 4P_2, \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1, \\ 5P_1 + 5P_3 = 3P_4. \end{cases} \quad (3)$$



По итогам решения получим предельные вероятности для системы T_3 : $P_1 = 0.02$; $P_2 = 0.21$; $P_3 = 0.28$; $P_4 = 0.49$.

Результаты эксперимента являются адекватными, не противоречат результатам исследования [9] и могут быть использованы для проведения дальнейших расчетов.

ВЫВОДЫ

Проведен ряд численных экспериментов при различной интенсивности потока событий для четырех состояний высокотемпературного воздействия пожара на остекление оконных проемов строительных зданий и сооружений перемещающимся источником теплоты.

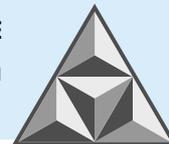
Определены предельные вероятности для T-образных систем. Для системы T_1 такая вероятность составляет 2% в состоянии O_1 , 35% отвечает состоянию O_2 , 28% – состоянию O_3 , 35% – состоянию O_4 . Система T_2 в среднем 3% будет находиться в состоянии O_1 , 10% – в состоянии O_2 , 16% – в состоянии O_3 , 71% – в состоянии O_4 . Система T_3 в среднем 2% будет находиться в состоянии O_1 , 21% – в состоянии O_2 , 28% – в состоянии O_3 , 49% – в состоянии O_4 .

При организации обеспечения пожарной безопасности строительных конструкций многоквартирных жилых домов необходимо:

- проведение расчетных вычислений для определения предельных вероятностей при выборе конструкционных материалов;
- совершенствование подходов к составлению планов установки конструкций для обеспечения пожарной безопасности;
- определение зависимости предельных вероятностей для системы контроля от динамики изменения этой системы в условиях сезонных рисков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Давыдов А.Н.** Марковский процесс как вероятностный метод оценки надежности дорожной одежды автомобильных дорог // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство: сб. статей / Самарский государственный технический университет.* Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. С. 116-119.
2. **Мисбахов Р.Ш., Мизонов В.Е.** Моделирование теплопроводности в составной области с фазовыми переходами // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета.* 2015. № 4. С. 39-43.
3. **Любимова Т.В.** Достоверность гидрогеологических прогнозов в зонах влияния водохранилищ // *Геология, география и глобальная энергия.* 2019. № 4. С. 99-106.
4. **Мизонов В.Е., Митрофанов А.В., Басова Е.В., Шуина Е.А.** Теоретическое исследование нелинейной теплопроводности в многослойной среде с фазовыми переходами в слоях // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета.* 2020. № 1. С. 53-59.
5. **Мизонов В.Е., Митрофанов А.В., Басова Е.В., Шуина Е.А.** Ячеичная модель теплопроводности в многослойной среде с переменным числом слоев // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета.* 2020. № 3. С. 51-57.
6. **Симонович О.С., Снежко В.Л., Козлов Д.В.** Периодичность ремонта низконапорных грунтовых плотин для сохранения их уровня безопасности // *Природообустройство.* 2020. № 1. С. 59-64.
7. **Огурцов В.А., Хохлова Ю.В., Алешина А.П., Фатахетдинов А.М.** Моделирование процессов получения сухих строительных смесей в лопастном аппарате непрерывного действия // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии.* 2019. № 2. С. 30-36.
8. **Гефан Г.Д.** Марковские процессы и системы массового обслуживания. Иркутск: Иркутский государственный университет путей и сообщений, 2009. С. 20-21.



9. **Гренандер У., Фрейбергер В.** Краткий курс вычислительной вероятности и статистики. Москва: Наука, 1978. С. 85-97.

Поступила в редакцию 30.05.2023

Одобрена после рецензирования 20.09.2023

Принята к опубликованию 22.09.2023

REFERENCES

1. **Davydov, A.N.** (2017) Markovsky process as a probabilistic method for assessing the reliability of the pavement of highways, *Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'stvo: sb. st. / Samarskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet*. Samara: Samarskij gosudarstvennyj arkhitekturno-stroitel'nyj universitet, pp. 116-119 (in Russian).
2. **Misbakhov, R.Sh. & Mizonov, V.E.** (2015) Modelling of thermal conductivity in a composite region with phase transitions, *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, (4), pp. 39-43 (in Russian).
3. **Lyubimova, T.V.** (2019) Reliability of hydrogeological forecasts in the zones of influence of reservoirs, *Geologiya, geografiya i global'naya energiya*, (4), pp. 99-106 (in Russian).
4. **Mizonov, V.E., Mitrofanov, A.V., Basova, E.V. & Shuina, E.A.** (2020) Theoretical study of nonlinear thermal conductivity in a multilayer medium with phase transitions in layers, *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, (1), pp. 53-59 (in Russian).
5. **Mizonov, V.E., Mitrofanov, A.V., Basova, E.V. & Shuina, E.A.** (2020) Cellular model of thermal conductivity in a multilayer medium with a variable number of layers, *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, (3), pp. 51-57 (in Russian).
6. **Simonovich, O.S., Snezhko, V.L., & Kozlov, D.V.** Periodicity of repair of low-pressure ground dams to preserve their safety level, *Prirodoobustrojstvo*, (1), pp. 59-64 (in Russian).
7. **Ogurtsov, V.A., Khokhlova, Yu.V., Alyoshina, A.P. & Fatakhedinov, A.M.** (2019) Modelling of the processes of obtaining dry building mixes in a continuous blade apparatus *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstrukcii. Tekhnologii*, (2), pp. 30-36 (in Russian).
8. **Gefan, G.D.** (2009) *Markov processes and queuing systems*. Irkutsk: Irkutskij gosudarstvennyj universitet putej i soobshchenij, pp. 20-21 (in Russian).
9. **Grenander, U. & Freiberger, V.** (1978) *A short course in computational probability and statistics*. Moscow: Nauka, pp. 85-97 (in Russian).

Received 30.05.2023

Approved after reviewing 20.09.2023

Accepted 22.09.2023