

Моделирование сети связи для управления действиями пожарных подразделений при тушении пожаров различной сложности

© М. В. Алешков¹, В. А. Басов¹, А. А. Колбасин¹,
А. А. Таранцев^{2, 3}, А. Л. Холостов^{1✉}

¹ Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

² Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149)

³ Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН (Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, 13)

РЕЗЮМЕ

Введение. Вопросам организации радиосвязи на пожаре, как важной части процесса управления пожарными подразделениями, уделяется значительное внимание. Эффективность управления на пожаре во многом зависит от устойчивой работы сети радиосвязи, в которой в зависимости от сложности ситуации могут работать различные должностные лица, управляющие процессом тушения пожара.

Методы. Моделирование работы сети радиосвязи основывается на методах теории массового обслуживания. Составляется перечень из n состояний, в которых может пребывать сеть связи, и соответствующий граф переходов. С учетом общепринятых допущений на основе графа переходов составляется система из n дифференциальных уравнений, связывающих вероятности состояний и интенсивности перехода в эти состояния. На основе полученных решений оценивается эффективность работы сети радиосвязи.

Результаты. В статье рассматриваются три варианта, для которых описаны возможные состояния, построены графы и составлены системы уравнений. В первом варианте в сети радиосвязи взаимодействуют три должностных лица, во втором — четыре, в третьем — также четыре должностных лица, но с иной иерархией управления. В первых двух случаях получены аналитические решения для вероятностей состояний, для третьего предлагается решение с использованием численных методов. Для каждого случая определены критические состояния, влияющие на устойчивость управления. Полученные решения сопровождаются примерами.

Выводы. Показана возможность моделирования сети радиосвязи на пожаре, как важнейшего элемента управления действиями пожарных подразделений. Рассмотрены три варианта взаимодействия должностных лиц с использованием сети радиосвязи. Разработанные для рассматриваемых случаев математические модели позволяют определить вероятностные характеристики функционирования сети радиосвязи и оценить возможность появления критических режимов, влияющих на эффективность управления действиями пожарных подразделений.

Ключевые слова: радиосвязь на пожаре; управление тушением пожара; теория массового обслуживания; математическая модель; граф переходов.

Для цитирования: Алешков М. В., Басов В. А., Колбасин А. А., Таранцев А. А., Холостов А. Л. Моделирование сети связи для управления действиями пожарных подразделений при тушении пожаров различной сложности // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 3. — С. 59–69. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.59-69.

✉ Холостов Александр Львович, e-mail: A.Holostov@academygps.ru

Modeling the communication network to control the action fire units to extinguish fires of various complexity

© Mikhail V. Aleshkov¹, Vadim A. Basov¹, Andrey A. Kolbasin¹,
Aleksandr A. Tarantsev^{2, 3}, Aleksandr L. Kholostov^{1✉}

¹ State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

² Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

³ Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (12th Line VO, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The organization of radio communication at the fire, as an important part of the fire units operating management, should be given a considerable attention. The effectiveness of fire units operating management depends largely on the steady of the radio network operation, in which, depending on the complexity of the situation, can work different officials who control the process of extinguishing the fire.

Methods. Modelling of radio network operation is based on Queuing theory methods. A list of n States in which the communication network and the corresponding transition graph can be compiled. Taking into account the generally accepted assumptions on the basis of the transition graph, a system of n differential equations connecting the probabilities of States and the intensity of the transition to these States is compiled. The stationary case is considered. Based upon the obtained solutions the efficiency of the radio network is estimated.

Results. The article presents three variants for which the possible States are described, graphs are constructed and systems of equations are composed. In the first variant, three officials interact inside the radio network, in the second, four officials interact. In the third variant the option of interaction between four fire units operating management with other hierarchy of management is considered. In the first two cases, analytical solutions for the States probabilities are obtained, for the third case, a solution using numerical methods is proposed. For each case, the critical States affecting the control stability are determined. The obtained solutions are followed by examples.

Conclusion. The possibility of modeling the radio communication network at the fire, as an important element of controlling of fire departments operating is demonstrated. Three variants of interaction between officials with use of a radio communication network are given. The mathematical models developed for the under consideration cases allow to estimate the probably characteristics of the radio network functioning. It allows us to assess the possibility of the probably of critical modes appearance that affect the effectiveness of the fire units operating management and the success his implementation.

Keywords: radio communication at the fire; manage fire-fighting; queueing theory; mathematical model; transition graph.

For citation: M. V. Aleshkov, V. A. Basov, A. A. Kolbasin, A. A. Tarantsev, A. L. Kholostov. Modeling the communication network to control the action fire units to extinguish fires of various complexity. *Pozharovzryvbezopasnost/ Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 59–69 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.59-69.

✉ Aleksandr Lvovich Kholostov, e-mail: A.Holostov@academygps.ru

Введение

Вопросам управления силами и средствами на пожаре и технологиям поддержки управленческих решений уделяется значительное внимание как в нашей стране [1–8], так и за рубежом [9–16].

Для того чтобы успешно руководить тушением пожара, необходимо эффективно использовать средства связи, обеспечивающие взаимодействие должностных лиц.

При этом необходимо решить ряд задач по обеспечению некоторых специфических характеристик сети связи, особое место среди которых занимают *доступность* и *пропускная способность*. Выполнение этих требований связано не только с применением средств связи, обладающих необходимыми техническими характеристиками, но и с правильной организацией связи на месте тушения пожара.

Эффективность управления на пожаре во многом зависит от устойчивой работы сети связи, в которой в зависимости от сложности ситуации могут находиться командиры звеньев (КЗ), руководитель тушения пожара (РТП), начальник штаба (НШ). При этом каждый из участников управления тушением пожара (абонент) должен иметь возможность незамедлительно связаться с другим абонентом в случае необходимости, а вероятность задержки (ожидания, если сеть связи занята) должна быть минимальной или не выходить за пределы допустимых значений.

Кроме того, от функционирования сети связи зависит не только успешность выполнения боевой задачи по тушению пожара, но и жизнь самих пожарных, уровень гибели которых достаточно высок не только в нашей стране, но и за рубежом [17].

К сожалению, вопросам моделирования связи на пожаре, являющейся важным средством управления, посвящено не так много работ [2, 6, 18, 19]. Остается неизученным вопрос об улучшении вышеупомянутых характеристик связи (и связанной с этим эффективности выполнения боевых действий по тушению пожара) с помощью организационных решений. Для этого, по нашему мнению, необходимо решить комплекс задач по определению вероятностных характеристик сети связи для различных вариантов ее организации. Эти варианты будут рассмотрены с учетом требований Боевого устава пожарной охраны, утвержденного в октябре 2017 г. приказом МЧС России и определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- описать возможные, наиболее распространенные варианты взаимодействия должностных лиц;
- разработать математические модели для рассмотренных вариантов взаимодействия;
- составить уравнения, связывающие вероятности нахождения сети связи в различных состояниях с интенсивностью передаваемых сообщений;
- на основе решения уравнений получить вероятностные характеристики, позволяющие организовать рациональное использование сети связи должностными лицами, участвующими в тушении пожара.

Анализ работ [6, 18, 19] подтверждает, что для моделирования работы сети связи на пожаре с успехом может быть использована теория массового обслуживания (ТМО) [20].

Таблица 1. Состояния сети связи в соответствии с графом переходов на рис. 1**Table 1.** The status of the network connection in accordance with the transition graph in Fig. 1

$\{S\}$	Состояние / Status	Примечание / Note
S_0	Сеть свободна / Network is free	
S_1	НБУ ₁ ↔ РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_2	НБУ ₂ ↔ РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_3	НБУ ₁ ↔ РТП, НБУ ₂ → РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	Задержка в управлении, критический случай
S_4	НБУ ₂ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	Control delay, critical case

Примечание. В таблицах и на рисунках $A_1 \leftrightarrow A_2$ — абонент A_1 ведет переговоры с абонентом A_2 (два черных кружка связаны линией); $A_1 \rightarrow A_2$ — абонент A_1 ждет связи с абонентом A_2 (белый кружок связан линией с черным кружком).

Note. Symbols here and further on: $A_1 \leftrightarrow A_2$ — subscriber A_1 negotiate with subscriber A_2 (two black circles are connected by a line); $A_1 \rightarrow A_2$ — subscriber A_1 is waiting for connection with subscriber A_2 (white circle is connected by a line with a black circle).

Основные положения теории массового обслуживания применительно к моделированию сети связи

Основной принцип ТМО применительно к моделированию различных процессов, в частности управления тушением пожара, заключается в следующем. Составляется перечень из n состояний $\{S\}$, в которых может пребывать система (в данном случае сеть связи), и соответствующий граф переходов. С учетом известных допущений [20] на основе графа переходов составляется система из n обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dp_i}{dt} = f_i(\{p\}, \{\lambda\}, \{\mu\}), \quad i \in [0; n-1], \quad (1)$$

где t — время с момента начала работы (в данном случае сети связи);

$\{p\}$ — вероятности состояний $\{S\}$, причем $p_0 + p_1 + \dots + p_{n-1} = 1$;

$\{\lambda\}, \{\mu\}$ — интенсивности переходов.

Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) с учетом начальных условий аналитическими или численными методами позволяет получить динамику вероятностей $\{p(t)\}$ состояний сети связи, сделать выводы об эффективности ее работы и сформулировать необходимые рекомендации по ее повышению.

Во многих случаях, полагая, что процессы приема-обслуживания вызовов установившиеся (т. е. $d\{p\}/dt = 0$), преобразуем систему обыкновенных дифференциальных уравнений (1) в систему алгебраических уравнений:

$$0 = f_i(\{p\}, \{\lambda\}, \{\mu\}), \quad i \in [0; n-1], \quad (2)$$

решение которой позволяет получить явные выражения для вероятностей состояний $\{p\}$.

Моделирование сети связи с использованием теории массового обслуживания

Случай первый. Если на пожаре организованы два боевых участка (БУ₁ и БУ₂), то в сети связи могут находиться РТП и начальники обоих боевых участков (НБУ₁ и НБУ₂). Такая сеть может пребывать в пяти состояниях S_0 – S_4 (табл. 1) с вероятностями p_0 – p_4 соответственно. Граф переходов представлен на рис. 1.

Система уравнений для стационарного случая в соответствии с графом на рис. 1 имеет вид:

$$\begin{cases} 0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2; \\ 0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_2 + \mu_1)p_1 + \mu_2 p_4; \\ 0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_3; \\ 0 = \lambda_2 p_1 - \mu_1 p_3; \\ 0 = \lambda_1 p_2 - \mu_2 p_4; \end{cases} \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^4 p_i = 1,$$

где λ_1, λ_2 — интенсивности необходимости переговоров между РТП и НБУ₁/НБУ₂ соответственно;

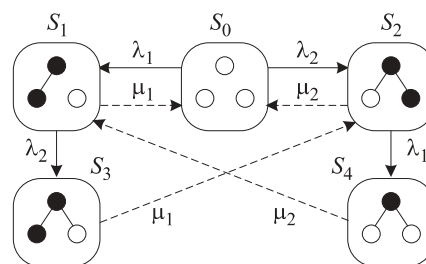


Рис. 1. Граф переходов для сети связи РТП (верхний кружок) с НБУ₁ (левый нижний кружок) и/или НБУ₂ (правый нижний кружок)

Fig. 1. The transition graph for the communication network: the officer in charge of fire extinguishing (upper circle) contacts the chief of site 1 (lower left circle) and/or the chief of site 2 (lower right circle)

μ_1, μ_2 — параметры, обратно пропорциональные среднему времени переговоров между РТП и НБУ₁/НБУ₂ соответственно;

$\{p\}$ — вероятности состояний $\{S\}$.

Для системы уравнений (3) получено точное аналитическое решение:

$$\begin{aligned} p_0 &= \frac{z}{z + x_1 \left(1 + \frac{\lambda_2}{\mu_1}\right) + x_2 \left(1 + \frac{\lambda_1}{\mu_2}\right)}; \\ p_1 &= p_0 \frac{x_1}{z}; \quad p_2 = p_0 \frac{x_2}{z}; \\ p_3 &= p_0 \frac{\lambda_2 x_1}{\mu_1 z}; \quad p_4 = p_0 \frac{\lambda_1 x_2}{\mu_2 z}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $z = \lambda_1 \mu_1 + \lambda_2 \mu_2 + \mu_1 \mu_2$;

$x_1 = \lambda_1 (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)$;

$x_2 = \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)$.

Критичными с точки зрения управления тушением будут состояния S_3 и S_4 . В первом случае РТП ведет переговоры с НБУ₁, а у НБУ₂ в это время тоже возникает необходимость связи с РТП, но он вынужден ожидать, что может привести к неконтролируемому развитию ситуации на втором БУ. Вероятность этого состояния p_3 . Аналогичная ситуация может возникнуть с вероятностью p_4 : РТП ведет переговоры с НБУ₂, а НБУ₁ вынужден ожидать связи с РТП.

Таким образом, общая вероятность критического состояния сети связи $p_{кр}$ может быть найдена из выражения

$$p_{кр} = p_3 + p_4 = \frac{\frac{\lambda_2 x_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_1 x_2}{\mu_2}}{z + x_1 \left(1 + \frac{\lambda_2}{\mu_1}\right) + x_2 \left(1 + \frac{\lambda_1}{\mu_2}\right)}. \quad (5)$$

Пример 1. Если $\lambda_1 = 1$; $\lambda_2 = 2$; $\mu_1 = 30$; $\mu_2 = 40$, то $p_0 = 0,92027$; $p_1 = 0,03020$; $p_2 = 0,04636$; $p_3 = 0,00201$; $p_4 = 0,00116$; $p_{кр} = 0,00317$.

Следует иметь в виду, что при $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ существует частное решение системы уравнений (3):

$$\begin{aligned} p_0 &= (1 + \alpha_1 + \alpha_2 + 2\alpha_1 \alpha_2)^{-1}; \\ p_1 &= \alpha_1 p_0; \\ p_2 &= \alpha_2 p_0; \\ p_3 &= p_4 = \alpha_1 \alpha_2 p_0, \end{aligned} \quad (6)$$

где α_1, α_2 — приведенные нагрузки;

$\alpha_1 = \lambda_1/\mu$; $\alpha_2 = \lambda_2/\mu$.

Пример 2. Если $\lambda_1 = 1$; $\lambda_2 = 2$; $\mu_1 = \mu_2 = 35$, то $\alpha_1 = 0,02857$; $\alpha_2 = 0,05714$; $p_0 = 0,91829$; $p_1 = 0,02624$; $p_2 = 0,05247$; $p_3 = p_4 = 0,00150$; $p_{кр} = 0,0030$.

Случай второй. Если на пожаре организованы три боевых участка, то в сети связи могут находиться РТП и начальники боевых участков — НБУ₁,

Таблица 2. Состояния сети связи в соответствии с графом переходов на рис. 2

Table 2. The status of the network connection in accordance with the transition graph in Fig. 2

$\{S\}$	Состояние / Status	Примечание / Note
S_0	Сеть свободна / Network is free	
S_1	НБУ ₁ ↔ РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_2	НБУ ₂ ↔ РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_3	НБУ ₃ ↔ РТП / The chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_4	НБУ ₁ ↔ РТП, НБУ ₂ → РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	S_4 – S_9 Задержка в управлении Control delay
S_5	НБУ ₁ ↔ РТП, НБУ ₃ → РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_6	НБУ ₂ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_7	НБУ ₂ ↔ РТП, НБУ ₃ → РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_8	НБУ ₃ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП / The chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_9	НБУ ₃ ↔ РТП, НБУ ₂ → РТП / The chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	S_{10} – S_{12} Критический случай Critical case
S_{10}	НБУ ₁ ↔ РТП, НБУ ₂ → РТП, НБУ ₃ → РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_{11}	НБУ ₂ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП, НБУ ₃ → РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_{12}	НБУ ₃ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП, НБУ ₂ → РТП / The chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	

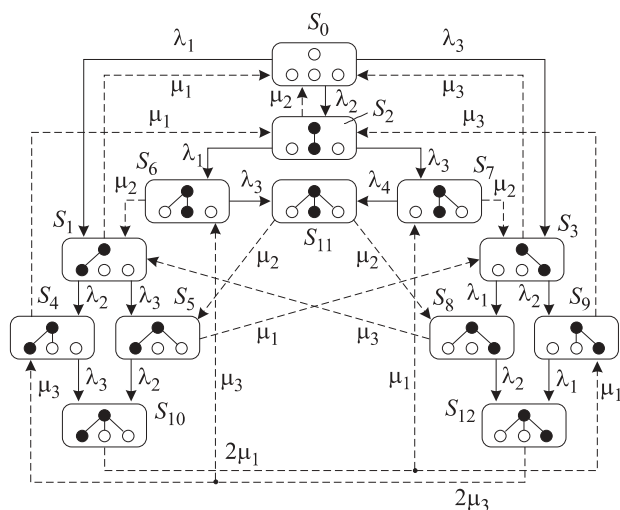


Рис. 2. Граф переходов для сети связи РТП (верхний кружок) с НБУ₁ (левый нижний кружок), НБУ₂ (средний нижний кружок) и НБУ₃ (правый нижний кружок)

Fig. 2. The transition graph for the communication network: the officer in charge of fire extinguishing (upper circle) contacts the chief of site 1 (lower left circle), the chief of site 2 (lower middle circle) and the chief of site 3 (lower right circle)

НБУ₂ и НБУ₃. Такая сеть может иметь 13 состояний S_0-S_{12} (табл. 2) с вероятностями соответственно p_0-p_{12} . Граф переходов представлен на рис. 2.

Система уравнений для стационарного случая в соответствии с графом на рис. 2 будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 0 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2 + \mu_3 p_3; \\
 0 &= \lambda_1 p_0 - (\lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1)p_1 + \mu_2 p_6 + \mu_3 p_8; \\
 0 &= \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_3 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_4 + \mu_3 p_9; \\
 0 &= \lambda_3 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3)p_3 + \mu_1 p_5 + \mu_2 p_7; \\
 0 &= \lambda_2 p_1 - (\lambda_3 + \mu_1)p_4 + \mu_3 p_{12}; \\
 0 &= \lambda_3 p_1 - (\lambda_2 + \mu_1)p_5 + \mu_2 p_{11}; \\
 0 &= \lambda_1 p_2 - (\lambda_3 + \mu_2)p_6 + \mu_3 p_{12}; \\
 0 &= \lambda_3 p_2 - (\lambda_1 + \mu_2)p_7 + \mu_1 p_{10}; \\
 0 &= \lambda_1 p_3 - (\lambda_2 + \mu_3)p_8 + \mu_2 p_{11}; \\
 0 &= \lambda_2 p_3 - (\lambda_1 + \mu_3)p_9 + \mu_1 p_{10}; \\
 0 &= \lambda_3 p_4 + \lambda_2 p_5 - 2\mu_1 p_{10}; \\
 0 &= \lambda_3 p_6 + \lambda_1 p_7 - 2\mu_2 p_{11}; \\
 0 &= \lambda_2 p_8 + \lambda_1 p_9 - 2\mu_3 p_{12}; \\
 \sum_{i=0}^{12} p_i &= 1,
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — интенсивности необходимости переговоров между РТП и НБУ₁/НБУ₂/НБУ₃ соответственно;

μ_1, μ_2, μ_3 — параметры, обратно пропорциональные среднему времени переговоров между РТП и НБУ₁/НБУ₂/НБУ₃ соответственно.

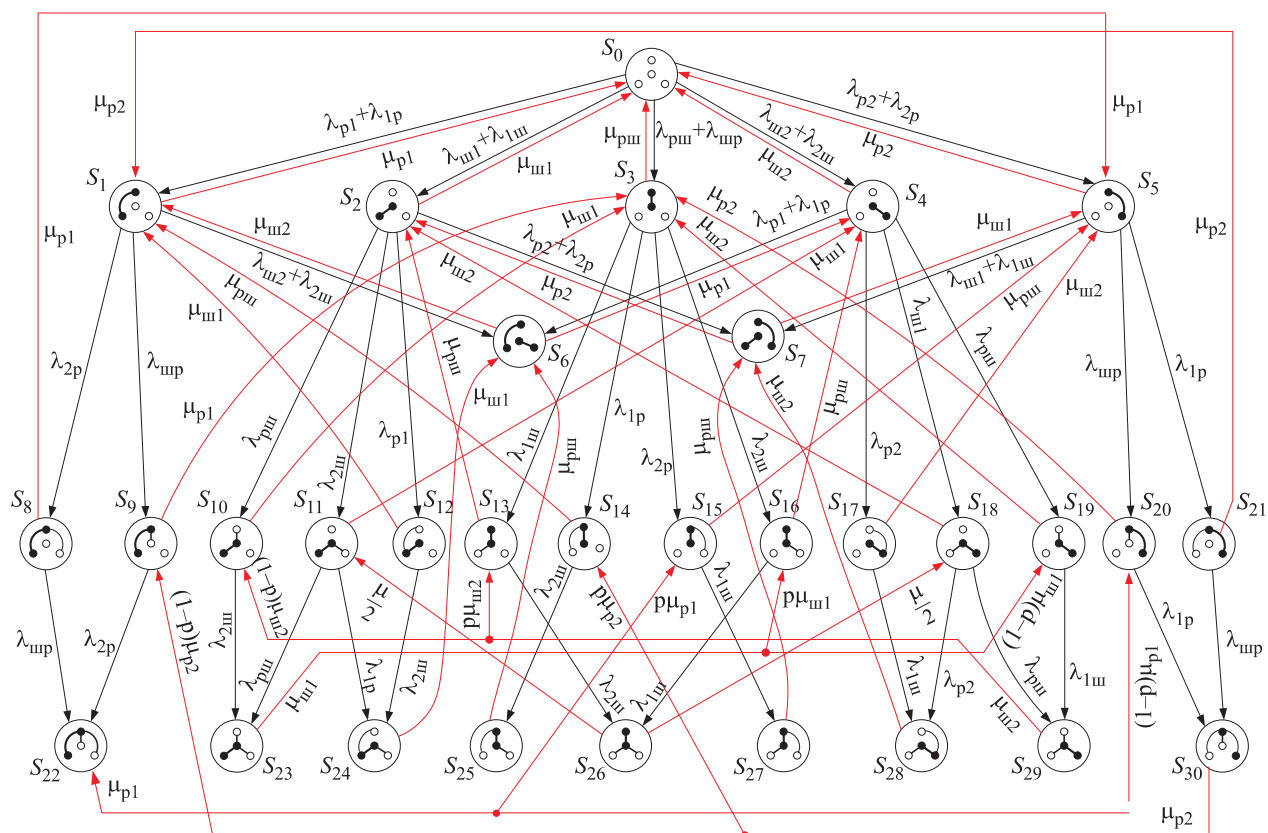


Рис. 3. Граф переходов для сети связи РТП (верхний кружок), НШ (средний кружок), НБУ₁ (левый нижний кружок) и НБУ₂ (правый нижний кружок)

Fig. 3. The transition graph for the communication network: the officer in charge of fire extinguishing (upper circle) contacts the chief of headquarter (middle circle), the chief of site 1 (lower left circle), the chief of site 2 (lower right circle)

Таблица 3. Состояния сети связи в соответствии с графом переходов на рис. 3

Table 3. The status of the network connection in accordance with the transition graph in Fig. 3

{S}	Состояние / Status	Примечание / Note
S_0	Сеть свободна / Network is free	
S_1	НБУ ₁ ↔ РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_2	НБУ ₁ ↔ НШ / The chief of site 1 with the chief of headquarter	
S_3	НШ ↔ РТП / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing	
S_4	НБУ ₂ ↔ НШ / The chief of site 2 with the chief of headquarter	
S_5	НБУ ₂ ↔ РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_6	НБУ ₁ ↔ РТП, НШ ↔ НБУ ₂ / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of headquarter with the chief of site 2	
S_7	НБУ ₂ ↔ РТП, НШ ↔ НБУ ₁ / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of headquarter with the chief of site 1	
S_8	НБУ ₁ ↔ РТП, НБУ ₂ → РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	S_8-S_{21} Задержка в управлении Control delay
S_9	НБУ ₁ ↔ РТП, НШ → РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing	
S_{10}	НБУ ₁ ↔ НШ, РТП → НШ / The chief of site 1 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of headquarter	
S_{11}	НБУ ₁ ↔ НШ, НБУ ₂ → НШ / The chief of site 1 with the chief of headquarter, the chief of site 2 with the chief of headquarter	
S_{12}	НБУ ₁ ↔ НШ, РТП → НБУ ₁ / The chief of site 1 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 1	
S_{13}	НШ ↔ РТП, НБУ ₁ → НШ / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the chief of headquarter	
S_{14}	НШ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_{15}	НШ ↔ РТП, НБУ ₂ → РТП / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_{16}	НШ ↔ РТП, НБУ ₂ → НШ / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the chief of headquarter	
S_{17}	НБУ ₂ ↔ НШ, РТП → НБУ ₂ / The chief of site 2 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 2	
S_{18}	НБУ ₂ ↔ НШ, НБУ ₁ → НШ / The chief of site 2 with the chief of headquarter, the chief of site 1 with the chief of headquarter	
S_{19}	НБУ ₂ ↔ НШ, РТП → НШ / The chief of site 2 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of headquarter	
S_{20}	НБУ ₂ ↔ РТП, НШ → РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing	
S_{21}	НБУ ₂ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_{22}	НБУ ₁ ↔ РТП, НШ → РТП, НБУ ₂ → РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	$S_{22}-S_{30}$ Критический случай Critical case
S_{23}	НБУ ₁ ↔ НШ, РТП → НШ, НБУ ₂ → НШ / The chief of site 1 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of headquarter, the chief of site 2 with the chief of headquarter	
S_{24}	НБУ ₁ ↔ НШ, РТП → НБУ ₁ , НБУ ₂ → НШ / The chief of site 1 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 1, the chief of site 2 with the chief of headquarter	
S_{25}	НШ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП, НБУ ₂ → НШ / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the chief of headquarter	
S_{26}	НШ ↔ РТП, НБУ ₁ → НШ, НБУ ₂ → НШ / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the chief of headquarter, the chief of site 2 with the chief of headquarter	

{S}	Состояние / Status	Примечание / Note
S_{27}	НШ ↔ РТП, НБУ ₁ → НШ, НБУ ₂ → РТП / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the chief of headquarter, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	$S_{22}-S_{30}$ Критический случай Critical case
S_{28}	НБУ ₂ ↔ НШ, НБУ ₁ → НШ, РТП → НБУ ₂ / The chief of site 2 with the chief of headquarter, the chief of site 1 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 2	
S_{29}	НБУ ₂ ↔ НШ, НБУ ₁ → НШ, РТП → НШ / The chief of site 2 with the chief of headquarter, the chief of site 1 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of headquarter	
S_{30}	НБУ ₂ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП, НШ → РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing	

Очевидно, состояния S_4-S_9 соответствуют тому, что хотя бы один из НБУ не может связаться с РТП, а это может представлять некоторую проблему при управлении тушением пожара. Состояния $S_{10}-S_{12}$ являются критическими, так как сразу два НБУ не могут связаться с РТП. Вероятность возникновения такой ситуации

$$p_{кр} = p_{10} + p_{11} + p_{12}. \quad (8)$$

Как и в предыдущем случае, существует частное решение системы уравнений (4) при $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu$:

$$\begin{aligned} p_0 &= [1 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \\ &\quad + 2(\alpha_1\alpha_2 + \alpha_1\alpha_3 + \alpha_2\alpha_3) + 6\alpha_1\alpha_2\alpha_3]^{-1}; \\ p_1 &= \alpha_1 p_0; \\ p_2 &= \alpha_2 p_0; \\ p_3 &= \alpha_3 p_0; \\ p_4 &= p_6 = \alpha_1 \alpha_2 p_0; \\ p_5 &= p_8 = \alpha_1 \alpha_3 p_0; \\ p_7 &= p_9 = \alpha_2 \alpha_3 p_0; \\ p_{10} &= p_{11} = p_{12} = 2\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 p_0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — приведенные нагрузки; $\alpha_1 = \lambda_1/\mu$; $\alpha_2 = \lambda_2/\mu$; $\alpha_3 = \lambda_3/\mu$.

Случай третий. Если в сети связи находятся РТП, НШ, НБУ₁ и НБУ₂, то такая сеть может иметь 31 состояние — S_0-S_{30} (табл. 3). Граф переходов представлен на рис. 3.

Система уравнений, связывающая вероятности состояний сети и интенсивности переходов, для стационарного случая в соответствии с графом на рис. 3 имеет вид:

$$\begin{aligned} 0 &= -(\lambda_{p1} + \lambda_{1p} + \lambda_{ш1} + \lambda_{1ш} + \lambda_{рш} + \lambda_{шр} + \lambda_{ш2} + \lambda_{2ш} + \\ &\quad + \lambda_{p2} + \lambda_{2p})p_0 + \mu_{p1}p_1 + \mu_{ш1}p_2 + \mu_{рш}p_3 + \mu_{ш2}p_4 + \mu_{p2}p_5; \\ 0 &= (\lambda_{p1} + \lambda_{1p})p_0 - (\lambda_{2p} + \lambda_{шр} + \mu_{p1} + \lambda_{ш2} + \lambda_{2ш})p_1 + \\ &\quad + \mu_{ш2}p_6 + \mu_{ш1}p_{12} + \mu_{рш}p_{14} + \mu_{p2}p_{21}; \\ 0 &= (\lambda_{ш1} + \lambda_{1ш})p_0 - (\lambda_{p1} + \lambda_{рш} + \lambda_{2ш} + \lambda_{p2} + \\ &\quad + \lambda_{2p} + \mu_{ш1})p_2 + \mu_{p2}p_7 + \mu_{рш}p_{13} + \mu_{ш2}p_{18}; \\ 0 &= (\lambda_{рш} + \lambda_{шр})p_0 - (\lambda_{1p} + \lambda_{1ш} + \lambda_{2p} + \lambda_{2ш} + \mu_{рш})p_3 + \\ &\quad + \mu_{p1}p_9 + \mu_{ш1}p_{10} + \mu_{ш2}p_{19} + \mu_{p2}p_{20}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0 &= (\lambda_{ш2} + \lambda_{2ш})p_0 - (\lambda_{1p} + \lambda_{p1} + \lambda_{ш1} + \lambda_{p2} + \lambda_{рш} + \\ &\quad + \mu_{ш2})p_4 + \mu_{p1}p_6 + \mu_{ш1}p_{11} + \mu_{рш}p_{16}; \\ 0 &= (\lambda_{p2} + \lambda_{2p})p_0 - (\lambda_{1p} + \lambda_{шр} + \mu_{p2} + \lambda_{ш1} + \lambda_{1ш})p_5 + \\ &\quad + \mu_{ш1}p_7 + \mu_{p1}p_8 + \mu_{рш}p_{15} + \mu_{ш2}p_{17}; \\ 0 &= (\lambda_{2ш} + \lambda_{ш2})p_1 + (\lambda_{1p} + \lambda_{p1})p_4 - (\mu_{ш2} + \mu_{p1})p_6 + \\ &\quad + \mu_{ш1}p_{24} + \mu_{рш}p_{25}; \\ 0 &= (\lambda_{p2} + \lambda_{2p})p_2 + (\lambda_{1ш} + \lambda_{ш1})p_5 - (\mu_{ш1} + \mu_{p2})p_7 + \\ &\quad + \mu_{рш}p_{27} + \mu_{ш2}p_{28}; \\ 0 &= \lambda_{2p}p_1 - (\lambda_{шр} + \mu_{p1})p_8; \\ 0 &= \lambda_{шр}p_1 - (\lambda_{2p} + \mu_{p1})p_9 + (1-p)\mu_{p2}p_{30}; \\ 0 &= \lambda_{рш}p_2 - (\lambda_{2ш} + \mu_{ш1})p_{10} + (1-p)\mu_{ш2}p_{29}; \\ 0 &= \lambda_{2ш}p_2 - (\lambda_{p1} + \lambda_{рш} + \mu_{ш1})p_{11} + 0,5\mu_{рш}p_{26}; \\ 0 &= \lambda_{p1}p_2 - (\lambda_{2ш} + \mu_{ш1})p_{12}; \\ 0 &= \lambda_{1ш}p_3 - (\lambda_{2ш} + \mu_{рш})p_{13} + p\mu_{ш2}p_{29}; \\ 0 &= \lambda_{1p}p_3 - (\lambda_{2ш} + \mu_{рш})p_{14} + p\mu_{p2}p_{30}; \\ 0 &= \lambda_{2p}p_3 - (\lambda_{1ш} + \mu_{рш})p_{15} + p\mu_{p1}p_{22}; \\ 0 &= \lambda_{2ш}p_3 - (\lambda_{1ш} + \mu_{рш})p_{16} + p\mu_{ш1}p_{23}; \\ 0 &= \lambda_{p2}p_4 - (\lambda_{1ш} + \mu_{ш2})p_{17}; \\ 0 &= \lambda_{1ш}p_4 - (\lambda_{p2} + \lambda_{рш} + \mu_{ш2})p_{18} + 0,5\mu_{рш}p_{26}; \\ 0 &= \lambda_{рш}p_4 - (\lambda_{1ш} + \mu_{ш2})p_{19} + (1-p)\mu_{ш1}p_{23}; \\ 0 &= \lambda_{шр}p_5 - (\lambda_{1p} + \mu_{p2})p_{20} + (1-p)\mu_{p1}p_{22}; \\ 0 &= \lambda_{1p}p_5 - (\lambda_{шр} + \mu_{p2})p_{21}; \\ 0 &= \lambda_{шр}p_8 + \lambda_{2p}p_9 - \mu_{p1}p_{22}; \\ 0 &= \lambda_{2ш}p_{10} + \lambda_{рш}p_{11} - \mu_{ш1}p_{23}; \\ 0 &= \lambda_{pp1}p_{11} + \lambda_{2ш}p_{12} - \mu_{ш1}p_{24}; \\ 0 &= \lambda_{2ш}p_{14} - \mu_{рш}p_{25}; \\ 0 &= \lambda_{2ш}p_{13} + \lambda_{1ш}p_{16} - \mu_{рш}p_{26}; \\ 0 &= \lambda_{1ш}p_{15} - \mu_{рш}p_{27}; \\ 0 &= \lambda_{1ш}p_{17} + \lambda_{p2}p_{18} - \mu_{ш2}p_{28}; \\ 0 &= \lambda_{рш}p_{18} + \lambda_{1ш}p_{19} - \mu_{ш2}p_{29}; \\ 0 &= \lambda_{1p}p_{20} + \lambda_{шр}p_{21} - \mu_{p2}p_{30}; \\ \sum_{i=0}^{30} p_i &= 1, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\{\lambda\}, \{\mu\}$ — параметры переговоров, приведенные в табл. 4.

Таблица 4. Интенсивности необходимости связи и переговоров между должностными лицами на пожаре

Table 4. The intensity of the need for communication and negotiations between the officials at a fire units operating management

$\{\lambda\}$	Интенсивность необходимости связи The intensity of the need for communication	$\{\mu\}$	Параметр, обратный времени переговоров между Option backwards the time of the negotiations between
$\lambda_{pш}$	РТП с НШ по инициативе РТП / Communication of the officer in charge of fire extinguishing with the chief of headquarter at the initiative of the officer in charge of fire extinguishing	$\mu_{pш}$	РТП и НШ / The officer in charge of fire extinguishing and the chief of headquarter
$\lambda_{шp}$	РТП с НШ по инициативе НШ / Communication of the officer in charge of fire extinguishing with the chief of headquarter at the initiative of the chief of headquarter	μ_{p1}	РТП и НБУ ₁ / The officer in charge of fire extinguishing and the chief of site 1
λ_{p1}	РТП с НБУ ₁ по инициативе РТП / Communication of the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 1 at the initiative of the officer in charge of fire extinguishing	μ_{p2}	РТП и НБУ ₂ / The officer in charge of fire extinguishing and the chief of site 2
λ_{1p}	РТП с НБУ ₁ по инициативе НБУ ₁ / Communication of the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 1 at the initiative of the chief of site 1	$\mu_{ш1}$	НШ и НБУ ₁ / The chief of headquarter and the chief of site 1
λ_{p2}	РТП с НБУ ₂ по инициативе РТП / Communication of the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 2 at the initiative of the officer in charge of fire extinguishing	$\mu_{ш2}$	НШ и НБУ ₂ / The chief of headquarter and the chief of site 2
λ_{2p}	РТП с НБУ ₂ по инициативе НБУ ₂ / Communication of the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 2 at the initiative of the chief of site 2	p	Вероятность приоритета связи РТП / The probability of communication priority of the head of the officer in charge of fire extinguishing
$\lambda_{ш1}$	НШ с НБУ ₁ по инициативе НШ / Communication of the chief of headquarter with the chief of site 1 at the initiative of the chief of headquarter		
$\lambda_{1ш}$	НШ с НБУ ₁ по инициативе НБУ ₁ / Communication of the chief of headquarter with the chief of site 1 at the initiative of the chief of site 1		
$\lambda_{ш2}$	НШ с НБУ ₂ по инициативе НШ / Communication of the chief of headquarter with the chief of site 2 at the initiative of the chief of headquarter		
$\lambda_{2ш}$	НШ с НБУ ₂ по инициативе НБУ ₂ / Communication of the chief of headquarter with the chief of site 2 at the initiative of the chief of site 2		

Решение системы линейных алгебраических уравнений (7) возможно только численными методами. Как следует из табл. 3 и графа на рис. 3, критичными для устойчивости управления на таком пожаре будут состояния S_{22} – S_{30} , вероятность чего

$$P_{кр} = \sum_{i=22}^{30} p_i. \quad (11)$$

Выводы

Таким образом, в работе показана возможность моделирования важнейшего элемента управления действиями пожарных подразделений — сети связи на пожаре с использованием теории массового обслуживания. В качестве примеров рассмотрены несколько вариантов сетей связи, в которых руководи-

тель тушения пожара взаимодействует с начальниками боевых участков и начальником штаба. Разработанные для рассматриваемых случаев математические модели позволяют определить вероятностные характеристики функционирования сети связи и оценить возможность появления критических режимов управления, когда у абонентов сети возникает экстренная необходимость связаться с другими участниками, которые, в свою очередь, уже ведут переговоры с абонентами сети.

В дальнейшем представляется целесообразным рассмотреть и другие варианты организации связи на пожаре, получить численные значения вероятностей состояний сети и сформулировать предложения по обеспечению устойчивости связи, в том числе с учетом надежности технических средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тербнев В. В., Семенов А. О., Тараканов Д. В. Теоретические основы принятия решений при управлении силами и средствами на пожаре // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2012. — Т. 21, № 10. — С. 14–17.

2. Тараканов Д. В., Баканов М. О., Колбашов М. А., Моисеев Ю. Н. Автоматизированная информационная система связи и управления пожарно-спасательными подразделениями // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 2-3. — С. 20–26. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.20-26.
3. Баканов М. О., Тараканов Д. В., Анкудинов М. В. Модель мониторинга для оперативного управления при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций // Мониторинг. Наука и технологии. — 2017. — № 3(32). — С. 77–80. URL: <http://www.csmos.ru/index.php?page=mnt-issue-2017-3-11> (дата обращения: 01.03.2019).
4. Топольский Н. Г., Тараканов Д. В., Баканов М. О. Многокритериальная модель мониторинга пожара в здании для управления пожарно-спасательными подразделениями // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 5. — С. 26–33. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.05.26-33.
5. Денисов А. Н. Методы, модели и алгоритмы поддержки управления пожарно-спасательными подразделениями при тушении пожаров : дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2018. — 406 с.
6. Пелех М. Т. Модели и методы оценивания и совершенствования деятельности государственной противопожарной службы (на примере Республики Коми) : дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2009. — 143 с.
7. Денисов А. Н., Степанов О. И. Алгоритм синтеза системы управления пожарными подразделениями на месте пожара // Техносферная безопасность. — 2018. — Т. 19, № 2. — С. 51–59.
8. Таранцев А. А., Холостов А. Л., Ищенко А. Д., Потапенко В. В. О задачах анализа и синтеза систем обслуживания заявок нескольких типов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 3. — С. 31–38. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03.31-38.
9. Wex F., Schryen G., Feuerriegel S., Neumann D. Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units // European Journal of Operational Research. — 2014. — Vol. 235, No. 3. — P. 697–708. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.10.029.
10. Griffith J. D., Kochenderfer M. J., Moss R. J., Mišić V. V., Gupta V., Bertsimas D. Automated dynamic resource allocation for wildfire suppression // Lincoln Laboratory Journal. — 2017. — Vol. 22, No. 2. — P. 38–59. URL: https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/page/doc/2018-06/22_2_3_Griffith.pdf (дата обращения: 05.03.2019).
11. Thompson M. P., Rodriguez y Silva F., Calkin D. E., Hand M. S. A review of challenges to determining and demonstrating efficiency of large fire management // International Journal of Wildland Fire. — 2017. — Vol. 26, No. 7. — P. 562–573. DOI: 10.1071/wf16137.
12. Pasnak I., Prydatko O., Gavriluk A. Development of algorithms for efficient management of fire rescue units // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2016. — Vol. 81, No. 3(81). — P. 22–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71604.
13. Sakellariou S., Tampekis S., Samara F., Sfougaris A., Christopoulou O. Review of state-of-the-art decision support systems (DSSs) for prevention and suppression of forest fires // Journal of Forestry Research. — 2017. — Vol. 28, No. 6. — P. 1107–1117. DOI: 10.1007/s11676-017-0452-1.
14. Katuwal H., Dunn C. J., Calkin D. E. Characterising resource use and potential inefficiencies during large-fire suppression in the western US // International Journal of Wildland Fire. — 2017. — Vol. 26, No. 7. — P. 604–614. DOI: 10.1071/wf17054.
15. O'Connor C. D., Calkin D. E., Thompson M. P. An empirical machine learning method for predicting potential fire control locations for pre-fire planning and operational fire management // International Journal of Wildland Fire. — 2017. — Vol. 26, No. 7. — P. 587–597. DOI: 10.1071/wf16135.
16. Martell D. L. A review of recent forest and wildland fire management decision support systems research // Current Forestry Reports. — 2015. — Vol. 1, No. 2. — P. 128–137. DOI: 10.1007/s40725-015-0011-y.
17. Fahy R. F., LeBlanc P. R., Molis J. Firefighter Fatalities in the United States — NFPA-2017. URL: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Emergency-responders/osFFF.pdf> (дата обращения: 05.03.2019).
18. Маркова Т. С., Таранцев А. А. Моделирование схемы взаимодействия сил и средств при ликвидации пожара в зоологическом парке // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2016. — № 1. — С. 85–92. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V81/14.pdf> (дата обращения: 01.03.2019).
19. Зыков В. И. Методологические основы моделирования и построения сетей оперативной связи в системе управления пожарной охраной : дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2001. — 321 с.
20. Вентцель Е. С. Исследование операций. — М. : Советское радио, 1972. — 552 с.

REFERENCES

1. V. V. Terebnev, A. O. Semenov, D. V. Tarakanov. Decision making theoretical basis of management of fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no 10, pp. 14–17 (in Russian).
2. D. V. Tarakanov, M. O. Bakanov, M. A. Kolbashov, Yu. N. Moiseev. Fire and rescue team communication and control automated information system. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 2-3, pp. 20–26 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.20-26.
3. M. O. Bakanov, D. V. Tarakanov, V. M. Ankudinov. The model of monitoring for operational management at the liquidation of emergency situations. *Monitoring. Science and Technologies*, 2017, no. 3(32), pp. 77–80 (in Russian). Available at: <http://www.csmos.ru/index.php?page=mnt-issue-2017-3-11> (Accessed 1 March 2019).
4. N. G. Topolskiy, D. V. Tarakanov, M. O. Bakanov. Multi-criteria model for monitoring of fire in the building for managing fire-rescue subdivisions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 5, pp. 26–33 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.05.26-33.
5. A. N. Denisov. *Methods, models and algorithms to support the management of fire and rescue units in fire fighting*. Dr. Sci. Diss. (Eng.). Moscow, 2018. 406 p. (in Russian).
6. M. T. Pelekh. *Models and methods of evaluation and improvement of the state fire service (on the example of the Republic of Komi)*. Cand. Sci. Diss. (Eng.). Saint Petersburg, 2009. 143 p. (in Russian).
7. A. N. Denisov, O. I. Stepanov. The algorithm of synthesis of management system of fire and rescue divisions on the fire place. *Tekhnosfernaya bezopasnost / Technosphere Safety*, 2018, vol. 19, no 2, pp. 51–59 (in Russian).
8. A. A. Tarantsev, A. L. Kholostov, A. D. Ishchenko, V. V. Potapenko. Problems of analysis and synthesis of application service systems of several types. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 3, pp. 31–38 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03.31-38.
9. F. Wex, G. Schryen, S. Feuerriegel, D. Neumann. Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units. *European Journal of Operational Research*, 2014, vol. 235, no. 3, pp. 697–708. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.10.029.
10. J. D. Griffith, M. J. Kochenderfer, R. J. Moss, V. V. Mišić, V. Gupta, D. Bertsimas. Automated dynamic resource allocation for wildfire suppression. *Lincoln Laboratory Journal*, 2017, vol. 22, no 2, pp. 38–59. Available at: https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/page/doc/2018-06/22_2_3_Griffith.pdf (Accessed 5 March 2019).
11. M. P. Thompson, F. Rodríguez y Silva, D. E. Calkin, M. S. Hand. A review of challenges to determining and demonstrating efficiency of large fire management. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, vol. 26, no 7, pp. 562–573. DOI: 10.1071/wf16137.
12. I. Pasnak, O. Prydatko, A. Gavrilyk. Development of algorithms for efficient management of fire rescue units. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol. 81, no 3(81), pp. 22–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71604.
13. S. Sakellariou, S. Tampekis, F. Samara, A. Sfougaris, O. Christopoulou. Review of state-of-the-art decision support systems (DSSs) for prevention and suppression of forest fires. *Journal of Forestry Research*, 2017, vol. 28, no. 6, pp. 1107–1117. DOI: 10.1007/s11676-017-0452-1.
14. H. Katuwal, C. J. Dunn, D. E. Calkin. Characterising resource use and potential inefficiencies during large-fire suppression in the western US. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, vol. 26, no. 7, pp. 604–614. DOI: 10.1071/wf17054.
15. C. D. O'Connor, D. E. Calkin, M. P. Thompson. An empirical machine learning method for predicting potential fire control locations for pre-fire planning and operational fire management. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, vol. 26, no 7, pp. 587–597. DOI: 10.1071/wf16135.
16. D. L. Martell. A review of recent forest and wildland fire management decision support systems research. *Current Forestry Reports*, 2015, vol. 1, no. 2, pp. 128–137. DOI: 10.1007/s40725-015-0011-y.
17. R. F. Fahy, P. R. LeBlanc, J. Molis. *Firefighter Fatalities in the United States — NFPA-2017*. Available at: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Emergency-responders/osFFF.pdf> (Accessed 5 March 2019).
18. T. S. Markova, A. A. Tarantsev. Circuit simulation of the interaction of forces and means at liquidation of a fire in a zoological park. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia. Scientific and Analytical Magazine*, 2016, no. 1, pp. 85–92 (in Russian). Available at: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V81/14.pdf> (Accessed 1 March 2019).

19. V. I. Zykov. *Methodological basis of modeling and construction of operational communication networks in the fire protection management system*. Dr. Sci. Diss. (Eng.). Moscow, 2001. 321 p. (in Russian).
20. E. S. Ventsel. *Issledovaniye operatsiy* [Operations research]. Moscow, Sovetskoye radio Publ., 1972. 552 p. (in Russian).

Поступила 09.03.2019; после доработки 19.04.2019; принята к публикации 23.04.2019
Received 9 March 2019; received in revised form 19 April 2019; accepted 23 April 2019

Информация об авторах

АЛЕШКОВ Михаил Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заместитель начальника по научной работе, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7844-1955

БАСОВ Вадим Анатольевич, первый заместитель начальника, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2779-5723

КОЛБАСИН Андрей Александрович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, научно-исследовательский отдел Учебно-научного комплекса пожарной и аварийно-спасательной техники, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-0140-7569

ТАРАНЦЕВ Александр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1561-2483, Scopus Author ID 57195636448, e-mail: t_54@mail.ru

ХОЛОСТОВ Александр Львович, д-р техн. наук, доцент, начальник кафедры пожарной автоматики, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2299-4221, e-mail: A.Holostov@academygps.ru

Information about the authors

Mikhail V. ALESHKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Head of Scientific Work, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7844-1955

Vadim A. BASOV, Deputy Head, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2779-5723

Andrey A. KOLBASIN, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Research Department of Educational-Scientific Complex Fire and Rescue Appliances, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0140-7569

Aleksandr A. TARANTSEV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Fire and Rescue Works, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; Head of Laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1561-2483, Scopus Author ID 57195636448, e-mail: t_54@mail.ru

Aleksandr L. KHOLOSTOV, Dr. Sci. (Eng.), Head of Fire Automation Department, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2299-4221, e-mail: A.Holostov@academygps.ru