

УДК 614.842.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТАКТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ РУКОВОДИТЕЛЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА НА ОСНОВЕ ХРОНОМЕТРАЖА ПОЖАРОВ

Мареев Михаил Александрович^{1,2}, Баканов Максим Олегович³, Гринченко Борис Борисович⁴

¹ Департамент спасательных формирований МЧС России, г. Москва, Российская Федерация

² Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация

⁴ Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Иваново, Российская Федерация

Аннотация. Изложены результаты проверки коэффициента эффективности тактических решений руководителя тушения пожара, включенного в стохастическую модель распределения ресурсов, построенную на базе метода изоморфных потоковых моделей. На начальной стадии крупного пожара обстановка остается неясной, поэтому даже большой расход огнетушащих веществ не всегда приводит к уменьшению площади пожара. Причиной является неверный выбор решающего направления и поздняя перегруппировка сил и средств. В модели это явление описано сигмоидальной функцией, зависящей от объема сведений, накопленных руководителем тушения пожара. Для проверки модели выполнен хронометраж радиопереговоров с трех крупных пожаров в резервуарных парках. По каждому пожару рассчитано накопление информации по алгоритму количественной оценки осведомленности. Показано, что до достижения порогового объема информации коэффициент эффективности тактических решений остается низким и площадь пожара продолжает расти, несмотря на подачу огнетушащих веществ. После преодоления порога тот же расход обеспечивает локализацию. Сделан вывод о том, что пороговое значение зависит от того, сколько информации способен удержать и обработать руководитель тушения пожара, а не от типа горящего объекта. Поэтому полученный показатель можно использовать для настройки стохастической модели и для обоснования требований к автоматическим системам охлаждения резервуаров.

Ключевые слова: осведомленность РТП, сигмоидальная функция, стохастическое моделирование, изоморфные потоковые модели, хронометраж, распределение ресурсов, резервуарный парк, время отдачи команды, когнитивные ограничения

Для цитирования: Мареев М. А., Баканов М. О., Гринченко Б. Б. Экспериментальная верификация коэффициента эффективности тактических решений руководителя тушения пожара на основе хронометража пожаров // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 115–124.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE EFFICIENCY COEFFICIENT OF FIRE SUPPRESSION LEADER'S TACTICAL DECISIONS BASED ON FIRE CHRONOMETER DATA

Mikhail A. Mareev^{1,2}, Maxim O. Bakanov³, Boris B. Grinchenko⁴

¹ Department of Rescue Formations of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russian Federation

² SFA of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

³ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

⁴ IFRA of SFS of EMERCOM of Russia, Ivanovo, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of testing the tactical efficiency coefficient of a firefighting manager (FSM) included in a stochastic resource allocation model constructed using the isomorphic flow model method. At the initial stage of a major fire, the situation remains unclear, so even a high consumption of fire extinguishing agents does not always lead to a reduction in the fire area. This is due to the incorrect choice of the decisive direction and the late redeployment of forces and resources. In the model, this phenomenon is described by a sigmoid function depending on the amount of information accumulated by the FSM. To test the model, the timing of radio communications from three major fires in tank farms was conducted. For each fire, the accumulation of information was calculated using an algorithm for quantitative assessment of awareness. It is shown that until the threshold amount of information is reached, the tactical efficiency coefficient remains low, and the fire area continues to grow despite the supply of fire extinguishing agents. After exceeding the threshold, the same consumption ensures localization. It is concluded that the threshold value depends on the amount of information the FSM can retain and process, and not on the type of burning object. Therefore, the obtained indicator can be used to adjust the stochastic model and to justify the requirements for automatic tank cooling systems.

Keywords: RTP awareness, sigmoid function, stochastic modeling, isomorphic flow models, timing, resource allocation, tank farm, command response time, cognitive limitations

For citation: Mareev M. A., Bakanov M. O., Grinchenko B. B. Experimental verification of the efficiency coefficient of fire suppression leader's tactical decisions based on fire chronometer data // Technosphere safety. 2026. No. 3 (52). P. 115–124.

Введение

На результат тушения пожара влияет не только количество поданных приборов тушения пожара, огнетушащих веществ и численность личного состава, но и то, насколько полно руководитель тушения пожара (РТП) представляет себе обстановку на пожаре [1].

В первые минуты пожара сведений мало, они отрывочны и часто противоречивы. В таких условиях даже большой расход огнетушащих веществ может не дать ожидаемого результата, выбор решающего направления оказывается ошибочным, основные силы отвлекаются на второстепенные участки, а перегруппировка проводится с запозданием [2–4].

В рамках метода изоморфных потоковых моделей [5, 6] этот эффект учитывается через коэффициент эффективности тактических решений $\eta(I_{\text{РТП}})$. Он входит в уравнение изменения площади пожара:

$$\frac{dS_i}{dt} = P_i \cdot V_n - \eta(I_{\text{РТП}}) \cdot \sum_{kv, tt} EF_{kv, tt} \cdot \rho_{kv, t} \cdot q_{kv, tt, i}, \quad (1)$$

где:

S_i — площадь пожара, м²;

P_i — периметр фронта пожара, м;

V_n — линейная скорость распространения пламени, м/с;

$EF_{kv, tt}$ — эффективность тушения, м²/л;

$\rho_{kv, t}$ — доля времени работы личного состава;

$q_{kv, tt, i}$ — расход огнетушащего вещества, л/с.

Коэффициент $\eta(I_{\text{РТП}})$ задается сигмоидальной функцией:

$$\eta(I_{\text{РТП}}) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(I_{\text{РТП}} - I_{\text{пор}})}}, \quad (2)$$

где:

$\alpha = 0,01 \text{ бит}^{-1}$ — скорость насыщения;

$I_{\text{РТП}}$ — объем информации, накопленной руководителем тушения пожара, бит;

$I_{\text{пор}}$ — пороговый объем информации, бит.

Для резервуарных парков принято $I_{\text{пор}} = 40 \text{ бит}$ [5]. Однако проверка этой величины на реальных пожарах до настоящего времени не проводилась. Настоящая работа восполняет указанный пробел.

Материалы и методы

Рассмотрены три крупных пожара в резервуарных парках, произошедшие в период с 2022 по 2026 год. По условиям конфиденциальности сведений о режимных объектах

точные даты и места пожаров не приводятся. Все данные обезличены и представлены только в том объеме, который необходим для расчетов. Обработано 87 радиосообщений, в которых содержались доклады о площади пожара, количестве поданных стволов, ранге пожара и имеющихся угрозах. Общие сведения о пожарах даны в табл. 1.

Для каждого момента времени, которому соответствует радиосообщение, объем информации определялся по алгоритму количественной оценки осведомленности [5]:

$$I_i(t) = \alpha_i \cdot e^{-\lambda_{\text{уст}} \Delta t} \cdot (\log_2(1 + \frac{S_i}{S_0}) + \log_2(1 + \frac{v_i}{v_0}) + \log_2(1 + \frac{T_i}{T_0}) + U_i + R_i), \quad (3)$$

где:

$\alpha_i = 0,8$ — достоверность радиодоклада;

$\lambda_{\text{уст}} = 0,03 \text{ с}^{-1}$ — коэффициент устаревания информации;

Δt — время с момента получения данных, с;

S_i — площадь пожара, м²;

$S_0 = 1 \text{ м}^2$ — порог чувствительности по площади;

v_i — скорость распространения, м/с;

$v_0 = 0,001$ м/с — порог чувствительности по скорости;

T_i — температура стенки резервуара, °С;

$T_0 = 20$ °С — порог чувствительности по температуре;

U_i — признак угрозы людям (0 или 1);

R_i — признак состояния путей эвакуации (0 или 1).

Таблица 1
Характеристика проанализированных пожаров

Table 1
Characteristics of the analyzed fires

Пожар Fire	Ранг Rank	Тип объекта Object type	Площадь горения, м ² Burning area, м ²	Количество сообщений Number of messages
1	№ 4	PBC-5000 RVS-5000	408	29
2	№ 3	PBC-2000 RVS-2000	163	28
3	№ 4	PBC-10000 RVS-10000	785	30

Введен температурный параметр, потому что для резервуарных парков именно температура стенки служит главным признаком

угрозы разрушения конструкции [7]. Скорость распространения определялась по изменению площади между соседними докладами:

$$v_i = \frac{S(t_{k+1}) - S(t_k)}{t_{k+1} - t_k}. \quad (4)$$

Скорость тушения вычислялась как изменение площади во времени. Отрицательные значения соответствуют локализации.

Дополнительно для каждого пожара фиксировалось время от момента получения доклада с признаками угрозы (резкий рост температуры, изменение направления факела) до момента отдачи руководителем распоряжения об изменении тактики. Это время сопоставлялось с текущим значением $I_{\text{РТП}}$.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показано накопление информации $I_{\text{РТП}}(t)$ для трех пожаров.

Порог 40 бит достигается, для пожара 1 — через 18 минут, для пожара 2 — через 24 минуты, для пожара 3 — через 15 минут. До преодоления порога рост информации идет медленно, поскольку докладов мало и они несут ограниченные сведения.

На рис. 2 расчетный коэффициент $\eta(I_{\text{РТП}})$ совмещен с фактической динамикой площади пожара для пожара 1.

До достижения порога площадь пожара растет, несмотря на подачу огнетушащих веществ. После преодоления порога рост замедляется, начинается локализация.

На рис. 3 приведена зависимость фактической скорости тушения от объема информации $I_{\text{РТП}}$ для всех трех пожаров.

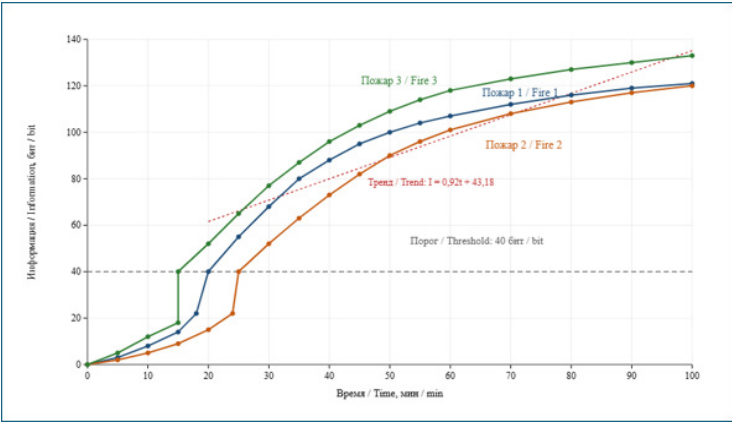


Рис. 1. Динамика накопления информации $I_{\text{РТП}}(t)$ для трех пожаров
Fig. 1. Dynamics of information accumulation $I_{\text{FIC}}(t)$ for three fires

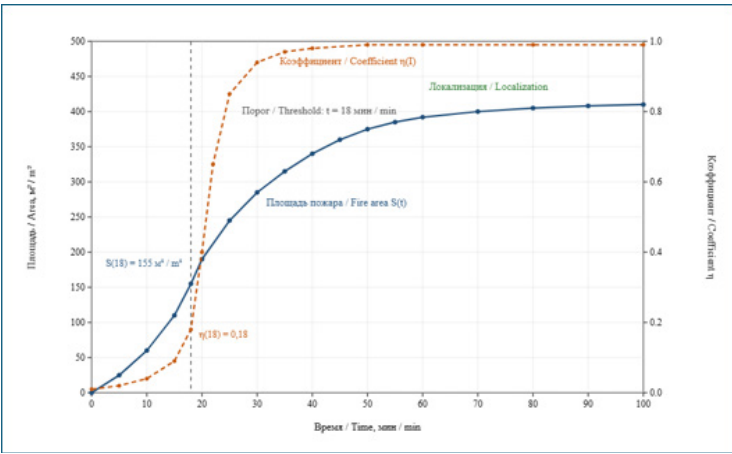


Рис. 2. Совмещение расчетного коэффициента $\eta(I_{\text{РТП}})$ с фактической динамикой площади пожара для пожара 1
Fig. 2. Superposition of the calculated coefficient $\eta(I_{\text{FIC}})$ with the actual fire area dynamics for Fire 1

Экспериментальные точки ложатся во-
круг сигмоидальной кривой. Коэффициент
корреляции составил $r = 0,89$ ($p < 0,01$).

Количественные результаты по каждому
пожару сведены в табл. 2. Для области $I_{\text{РТП}} > I_{\text{пор}}$
получена регрессионная зависимость:

$$S_{\text{туш}} = 0,12 \cdot I_{\text{РТП}} - 1,8, \quad R^2 = 0,83, \quad (5)$$

где $S_{\text{туш}}$ — скорость тушения, $\text{м}^2/\text{мин}$.

Таблица 2
Сопоставление параметров до и после достижения порога

Table 2
Comparison of parameters before and after reaching the threshold

Пожар Fire	Время достижения порога, мин Threshold reaching time, min	Скорость роста площа- ди до порога, $\text{м}^2/\text{мин}$ Fire area growth rate before threshold, m^2/min	Скорость роста площади после порога, $\text{м}^2/\text{мин}$ Fire area growth rate after threshold, m^2/min	Кратность снижения Reduction ratio
1	18	0,85	0,23	3,7
2	24	0,60	0,20	3,0
3	15	1,15	0,46	2,5

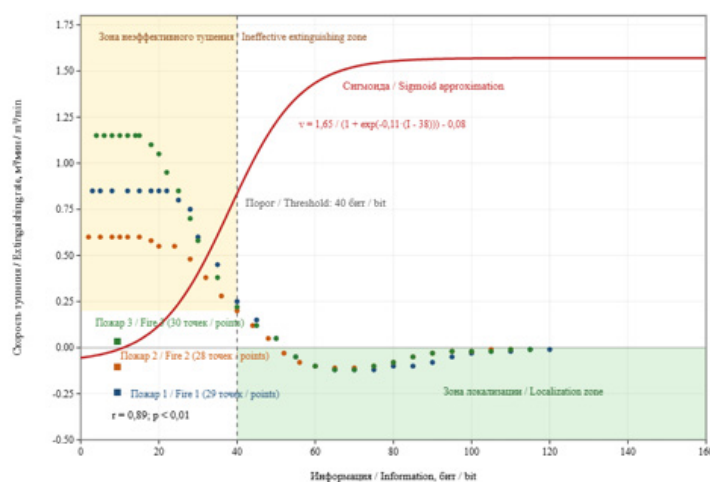


Рис. 3. Зависимость фактической скорости тушения от объема информации $I_{\text{РТП}}$
 Fig. 3. Dependence of the actual extinguishing rate on the amount of information I_{FIC}

В табл. 3 показано, как время отдачи команды зависит от объема информации. Коэффициент $\eta(I_{\text{РТП}})$ — не отвлеченная величина. Он показывает, какая часть поданных огнетушащих веществ дает полезный результат. При $\eta < 0,2$ подача ОТВ практически не сказывается на площади пожара. После преодоления порога тот же расход обеспечивает его локализацию.

Это объясняет известное в практике явление: РТП еще не накопил достаточно сведений для выбора решающего направления и расстановки сил и средств [8, 9].

Полученное пороговое значение 40 бит хорошо согласуется с известными данными о возможностях человеческой памяти. Из психологии известно, что в обычных условиях человек удерживает в оперативной памяти 7 ± 2 элемента, а в стрессовой обстановке — всего 3–4 элемента [10, 11].

В рассматриваемой задаче каждым таким элементом является резервуар, о котором РТП должен удерживать пять тактических параметров: площадь пожара, скорость распространения, температуру стенки, угрозу людям и состояние путей

эвакуации. Если каждый параметр имеет не более восьми различных градаций, то информация об одном участке составляет $\log_2(8^5) = 15$ бит, а с учетом двух бинарных признаков — до 17 бит.

Если РТП способен одновременно удерживать в памяти 3–4 таких элемента, то суммарный объем информации, которым он может оперировать, составляет 34–51 бит. Экспериментально полученное значение 40 бит находится внутри этого диапазона. Это подтверждает, что пороговое значение определяется ограниченными возможностями человека по обработке информации, а не свойствами горящего объекта. Из табл. 3 следует, что при $I_{\text{РТП}} < 20$ бит время отдачи команды составляет в среднем 95 с, а при $I_{\text{РТП}} > 40$ бит — 18 с. Иными словами, до преодоления порога РТП задерживает распоряжения примерно на полторы минуты. Для стенки резервуара, нагревающейся со скоростью $0,5^\circ\text{C}/\text{с}$ при тепловом потоке $50 \text{ кВт}/\text{м}^2$, за 95 с температура возрастает на 47°C . Такая задержка может привести к достижению критической температуры стенки до начала активного охлаждения [7].

Для резервуарных парков это означает, что в первые 15–24 мин после прибытия

первых подразделений эффективность тушения остается низкой.

Таблица 3
Время отдачи команды в зависимости от объема информации

Table 3

Command time depending on the amount of information

Диапазон $I_{\text{РТП}}$, бит I_{FC} range, bit	Среднее время отдачи команды, с Average command time, s	Доля команд с задержкой более 60 с, % Share of commands with a delay of more than 60 s, %
<20	95	67
20–40	45	28
>40	18	6

Заключение

По результатам хронометража 87 радиосообщений с трех крупных пожаров в резервуарных парках подтверждено пороговое значение $I_{\text{пор}} = 40$ бит.

При $\eta < 0,2$ расход огнетушащих веществ не обеспечивает уменьшения площади пожара. После преодоления порога тот же расход приводит к локализации. Кратность снижения скорости роста площади составляет 2,5–3,7.

Время отдачи команды сокращается с 95 с при $I_{\text{РТП}} < 20$ бит до 18 с при $I_{\text{РТП}} > 40$ бит. В первые минуты пожара такая задержка способна привести к нагреву стенки ре-

зервуара на 40–50 °С до начала активного охлаждения.

Пороговое значение определяется когнитивными возможностями руководителя тушения пожара, а не типом объекта. Это развивает научные основы тактики тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ, впервые формируя количественный критерий, отделяющий фазу неэффективного распределения сил и средств от фазы устойчивой локализации пожара. На этом обосновываются требования к автоматическим системам охлаждения резервуаров, срабатывающим в первые минуты пожара без участия РТП.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Генезис развития, современные реалии научно-методического и нормативного правового обоснования понятий «крупный пожар», «сложный (затяжной) пожар» / А. Н. Денисов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2025. Т. 34, № 2. С. 5–19. EDN: XVYUPE.
2. Денисов А. Н., Тай Н. Т. Формализация граничных условий для моделей и алгоритмов задачи идентификации ситуаций, складывающихся на месте пожара // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. 2023. № 1–2. С. 26–30. EDN: ETADMQ.
3. Баканов М. О. Влияние теплового стресса на когнитивные функции пожарных: анализ эмпирических данных / М. О. Баканов, Б. Б. Гринченко, Д. Ю. Захаров // Современные аспекты

пожарной безопасности : материалы научно-практической конференции. Балашиха, 2026. С. 274–278. EDN: SVUYSC.

4. Копылов Н. П., Карпов А. В., Федоткин Д. В. Аэродинамические и температурные характеристики пожаров в резервуарах с нефтепродуктами // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2018. № 1. С. 31–34. EDN: QHOYKX.

5. Мареев М. А. Нормативно-параметрическая модель динамики боевых действий во время пожара на основе метода электрогидравлических аналогий // Современные проблемы гражданской защиты. 2026. № 2 (59). С. 45–58.

6. Мареев М. А. Экспериментальное определение потерь напора в магистральных рукавных линиях и их аппроксимация для обоснования тактики тушения пожаров // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2026. № 2 (41). С. 368–380.

7. Математическая модель охлаждения борта резервуара после тушения пожара нефтепродуктов / Н. П. Копылов [и др.] // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXVIII Международной научно-практической конференции. 2016. С. 273–282. EDN: YGQEDV.

8. Endsley M. R. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems // Human Factors. 1995. Vol. 37. No. 1. P. 32–64.

9. Клайн Г. Источники силы: как люди принимают решения. М., 2020. 480 с. EDN: XGFFNX.

10. Miller G. A. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information // Psychological Review. 1956. Vol. 63. No. 2. P. 81–97.

11. Wickens C. D. Situation awareness: Review of Mica Endsley's 1995 articles on situation awareness theory and measurement // Human Factors. 2008. Vol. 50. No. 3. P. 397–403.

REFERENCES

1. Genesis of Development, Modern Realities of Scientific, Methodological and Normative Legal Substantiation of the Concepts of "Major Fire", "Complex (Protracted) Fire" / A. N. Denisov [et al.] // Fire and Explosion Safety. 2025. Vol. 34. No. 2. P. 5–19. EDN: XUYUPE.

2. Denisov A. N., Tai N. T. Formalization of Boundary Conditions for Models and Algorithms for Identifying Situations Developing at the Fire Site // Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. 2023. No. 1-2. P. 26–30. EDN: ETADMQ.

3. Bakanov M. O., Grinchenko B. B., Zakharov D. Yu. The Impact of Heat Stress on the Cognitive Functions of Firefighters: An Analysis of Empirical Data // Modern Aspects of Fire Safety : Proceedings of the Scientific and Practical Conference. Balashikha, 2026. P. 274–278. EDN: SVUYSC.

4. Kopylov N. P., Karpov A. V., Fedotkin D. V. Aerodynamic and Temperature Characteristics of Fires in Oil Tanks // Environmental Protection in the Oil and Gas Complex. 2018. No. 1. P. 31–34. EDN: QHOYKX.

5. Mareev M. A. Normative-parametric model of the dynamics of combat operations during a fire based on the method of electrohydraulic analogies // Modern Problems of Civil Defense. 2026. No. 2 (59). P. 45–58.

6. Mareev M. A. Experimental Determination of Pressure Losses in Main Hose Lines and Their Approximation to Substantiate Fire Extinguishing Tactics // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2026. No. 2 (41). P. 368–380.

7. Mathematical Model of Tank Side Cooling after Extinguishing an Oil Product Fire / N. P. Kopylov [et al.] // Actual Problems of Fire Safety : Proceedings of the XXVIII International Scientific and Practical Conference. 2016. P. 273–282. EDN: YGQEDV.
8. Endsley M. R. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems // Human Factors. 1995. Vol. 37. No. 1. P. 32–64.
9. Kline G. Sources of Power: How People Make Decisions. Moscow, 2020. 480 p. EDN: XGFFNX.
10. Miller G. A. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information // Psychological Review. 1956. Vol. 63. No. 2. P. 81–97.
11. Wickens C. D. Situation awareness: Review of Mica Endsley's 1995 articles on situation awareness theory and measurement // Human Factors. 2008. Vol. 50. No. 3. P. 397–403.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мареев Михаил Александрович, заместитель начальника отдела Департамента спасательных формирований МЧС России (121357, Российская Федерация, г. Москва, ул. Ватутина, д. 1), преподаватель кафедры пожарной тактики и службы Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4); SPIN-код: 2799-9425; Author ID: 1232680; ORCID: 0009-0007-6084-2321; e-mail: mareev.mikhail@mail.ru

Баканов Максим Олегович, д-р техн. наук, доцент, советник РААСН, профессор кафедры информатики и прикладной математики Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское ш., д. 26); SPIN-код: 3185-5193; Author ID: 802943; ORCID: 0000-0002-5427-8767; e-mail: mask-13@mail.ru

Гринченко Борис Борисович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарно-строевой, физической подготовки и газодымозащитной службы Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (153040, Российская Федерация, г. Иваново, просп. Строителей, д. 33); SPIN-код: 6329-2575; Author ID: 864204; ORCID: 0000-0003-1759-2308; e-mail: grinchenko.borya@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail A. Mareev, Deputy Head of Department of Rescue Teams, Ministry of Emergency Situations of Russia (1 Vatutina St., Moscow, 121357, Russian Federation), Lecturer of Department of Fire Tactics and Service, SFA of EMERCOM of Russia (4 Borisa Galushkina St., Moscow, 129366, Russian Federation); SPIN-code: 2799-9425; Author ID: 1232680; ORCID: 0009-0007-6084-2321; e-mail: mareev.mikhail@mail.ru

Maxim O. Bakanov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor of Department of Computer Science and Applied Mathematics, National Research Moscow State University of Civil Engineering (26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation); SPIN-code: 3185-5193; Author ID: 802943; ORCID: 0000-0002-5427-8767; e-mail: mask-13@mail.ru

Boris B. Grinchenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Fire-Fighting, Physical Training, and Gas and Smoke Protection Service, IFRA of SFS of EMERCOM

of Russia (40 Stroiteley Avenue, Ivanovo, 331530, Russian Federation); SPIN-code: 6329-2575;
Author ID: 864204; ORCID: 0000-0003-1759-2308; e-mail: grinchenko.borya@mail.ru