
ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научная статья

УДК 614.841.41; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-117-126

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА КОМПОНЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ВОДНОГЕЛЕВЫМИ ОГNETУШАЩИМИ СОСТАВАМИ

Воронцов Тарас Сергеевич.

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Иваново, Россия.

✉ **Иванов Алексей Владимирович.**

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

✉ *ivanov.av@igps.ru*

Аннотация. С помощью методов регрессионного анализа и нейросетевого моделирования определены физические свойства водногелевых составов, обеспечивающие минимальное время тушения пожара модельного очага компонентов промышленных взрывчатых веществ. Нейросетевое моделирование выполнено в программе «STATISTICA Application 10». Максимальное расхождение значений нейросетевой модели с экспериментальными данными 0,18 %. Регрессионный анализ выполнен в программе «REGGRAN». Максимальная погрешность целевых значений составила 4,4 %. Анализ экспериментальных данных и результатов математического моделирования показал, что наиболее значимыми свойствами огнетушащих веществ на основе гидрогелей, обеспечивающими минимальное время тушения, являются плотность и поверхностное натяжение. Определены концентрации гелеобразователя, при которых водногелевый состав приобретает оптимальные физические свойства для тушения модельного очага компонента промышленного взрывчатого вещества. Разработаны рекомендации по созданию рецептур гидрогелей с заданными свойствами.

Ключевые слова: регрессионный анализ, нейросетевое моделирование, пожаротушение, промышленные взрывчатые вещества

Для цитирования: Воронцов Т.С., Иванов А.В. Прогнозирование времени тушения модельного очага пожара компонентов промышленных взрывчатых веществ при использовании водногелевых огнетушащих составов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 2 (70). С. 117–126. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-117-126.

Scientific article

PREDICTING THE FIRE EXTINGUISHING TIME OF EXPLOSIVE COMPONENTS USING FIRE EXTINGUISHING HYDROGELS

Vorontsov Taras S.**Ivanovo fire and rescue academy of State fire service of EMERCOM of Russia, Ivanovo, Russia.**✉ **Ivanov Aleksey V.****Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia**✉ ***ivanov.av@igps.ru***

Abstract. Using methods of regression analysis and neural network research, it was possible to preserve the physical properties of water-gel compositions and ensure a minimum time for extinguishing a fire in a model fire with components of industrial explosives. Neural network modeling was performed in the STATISTICA Application 10 program. The maximum discrepancy between the results of the neural network model and experimental data is 0,18 %. Regression analysis was performed in the REGRAN program. The maximum error in target results was 4,4 %. Analysis of experimental data and mathematical modeling results showed that the most significant properties of fire extinguishing agents based on hydrogels, providing minimal extinguishing time, are density and surface tension. The concentrations of the gelling agent were determined at which the water-gel composition acquires optimal physical properties for extinguishing a model outbreak of a component of an industrial explosive. Recommendations have been developed for creating hydrogel formulations with desired properties.

Keywords: regression analysis, neural network modeling, firefighting, industrial explosives

For citation: Vorontsov T.S., Ivanov A.V. Prediction of the time of extinguishing a model fire of components of industrial explosives when using water-gel fire extinguishing compositions // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 2 (70). P. 117–126. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-117-126.

Введение

Ликвидация пожаров на объектах с обращением промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) всегда сопряжена с угрозой жизни для участников тушения, высокой вероятностью перехода горения на участки с наличием ПВВ в упаковке из твердых горючих материалов, возникновением множественных вторичных очагов вследствие взрывов [1, 2].

В таких условиях целесообразно применение огнетушащих веществ (ОТВ), обладающих высокой теплоизолирующей и огнетушащей способностью, возможностью их применения в роботизированных установках пожаротушения [3], беспилотных авиационных средствах [4, 5], стационарных системах тепловой защиты [6].

Одними из перспективных ОТВ, обеспечивающих высокую огнетушащую способность и теплоизоляционные свойства, являются водногелевые составы (ВГС). Экспериментальные исследования применения ВГС в качестве ОТВ при тушении компонентов ПВВ показали сокращение времени на 62,5 % в стандартных и перспективных системах пожаротушения [5].

Работы [7, 8] показали, что в условиях применения ВГС при тушении пожаров классов «А» и «В» наиболее значимыми характеристиками являлись скорость нагрева до температуры кипения и коэффициент поверхностного натяжения, однако для условий горения ПВВ данные свойства определены не были.

Целью настоящего исследования было определение влияния физических и химических свойств гидрогелей, влияющих на сокращение времени тушения пожаров компонентов ПВВ, и разработка рекомендаций по созданию ОТВ с заданными свойствами.

Материалы и методы исследований

В качестве исходных данных использовались результаты исследований, изложенные в работах [5–8]. Задача определения влияния физико-химических свойств ВГС на время тушения компонентов ПВВ решалась в программных продуктах «STATISTICA Application 10» [9] и «REGRAN» [10]. Программы «REGRAN» и «STATISTICA Application 10» неоднократно применялись для решения задач математического моделирования в сфере пожаротушения и обеспечения пожарной безопасности [11–13]. Для верификации регрессионных моделей использовался метод нейросетевого моделирования [14–16]. Для построения нейросетевой модели применялся многослойный персептрон (рис. 1) с двумя скрытыми слоями от 4 до 20 нейронов в каждом.

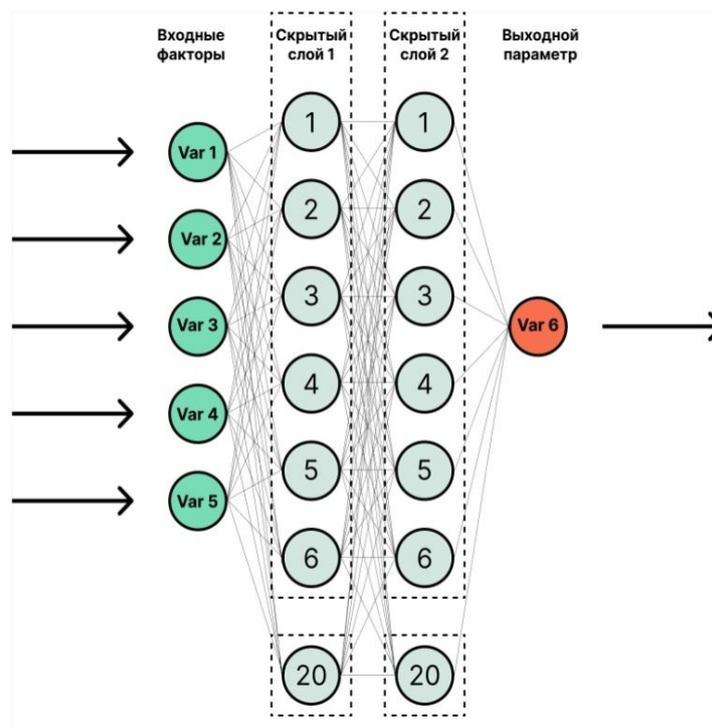


Рис. 1. Структура многослойного персептрона

Исходя из результатов работ [5–8], были выбраны входные данные (табл. 1), влияющие на эксплуатационные характеристики ОТВ при тушении ПВВ. В качестве выходных данных (Y) использовались результаты определения времени тушения модельного очага ПВВ [5].

Таблица 1

Наименования данных

Условное обозначение	Исходное наименование	Единицы измерения
Var 1/ X_1	Плотность (ρ_i)	кг/м ³
Var 2/ X_2	Коэффициент поверхностного натяжения (σ_i)	Н/м
Var 3/ X_3	Динамическая вязкость (μ_i)	Па·с
Var 4/ X_4	Скорость нагрева до температуры кипения ($dT/d\tau$)	°С/мин
Var 5/ X_5	Кислотность (рН)	–
Var 6/Y	Время пожаротушения (τ)	с

При проведении регрессионного анализа зависимость времени тушения от свойств ВГС описывалась в виде квазилинейного уравнения регрессии:

$$y = \sum_{j=1}^M a_j z_j,$$

где a_j – искомый коэффициент регрессии; z_j – условная функция, зависящая от факторов $x_1 \div x_5$; M – число таких функций.

С использованием программы «REGRAN» путем форсированного перебора подбирались условные факторы $\{z_i\}$, а методом наименьших квадратов рассчитывался коэффициент регрессии $\{a_i\}$ из условия:

$$D_j = (N - M_j)^{-1} \cdot \sum_{j=1}^N (y_{ji}^a - y_{ji}^B)^2 \rightarrow \min,$$

где y_{ji}^a, y_{ji}^B – полученное и вычисленное по уравнению регрессии в ходе i испытания значение j выходного параметра (ВП), соответственно для i сочетания входных факторов (ВФ); N – число испытаний.

Адекватность полученного уравнения регрессии оценивалась по критерию Фишера F :

$$F_j = \frac{D_{jo}}{D_j},$$

где D_{jo} – дисперсия значений результатов в экспериментальных исследованиях.

Зависимость $\{y\}$ от $\{x_1 \div x_5\}$ может быть описана множеством адекватных уравнений, для удобства вычислений которых введены преобразования. Для построения регрессионных моделей применялся принцип многомодальности, тем самым обеспечивая объективность прогноза $\{y\}$ и результата оценки значимости $\{x_1 \div x_5\}$. Входные параметры были преобразованы:

$$\phi_1 = 0,01(x_1 - 1000) + 0,5; \phi_2 = x_2 \cdot 10; \phi_3 = 1,5 + \lg(x_3); \phi_4 = x_4; \phi_5 = x_5/10.$$

Результаты и их обсуждение

При анализе 50 построенных нейросетевых моделей было отобрано три с наиболее высоким коэффициентом детерминации (табл. 2).

Таблица 2

Выборка моделей в программном продукте «STATISTICA Application 10»

Net. name	Training perf.	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm	Hidden activation	Output activation
1	2	3	4	5	6	7	8
MLP 5-20-1	0,998538	0,020983	0,00101	8,38649	BFGS 37	Tanh	Identity
MLP 5-3-1	0,999998	0,000026	0,00207	23,77020	BFGS 53	Logistic	Identity
MLP 5-5-1	0,999959	0,000815	0,00401	0,00052	BFGS 22	Tanh	Exponential

Анализ чувствительности ВП на ВФ табл. 3 показал, что наиболее весомыми для тушения компонентов ПВВ являются динамическая вязкость (Var 3) и коэффициент поверхностного натяжения (Var 2) и менее значимыми – плотность (Var 1), кислотность (Var 5), а скорость нагрева до температуры кипения (Var 4) ВГС оказалась малозначимой переменной.

Чувствительность ВП к ВФ в программном продукте «STATISTICA Application 10»

	Var3	Var2	Var1	Var5	Var4
MLP 5-20-1	2752,303	2135,532	140,1628	90,04968	16,98821
MLP 5-3-1	1375441	305898,1	207360,6	121406,4	17821,90
MLP 5-5-1	21689,75	16756,31	12190,59	8630,539	1814,285

Распределение целевых и выходных значений для каждой сети (рис. 2) демонстрирует, что модельные значения приближены к целевым.

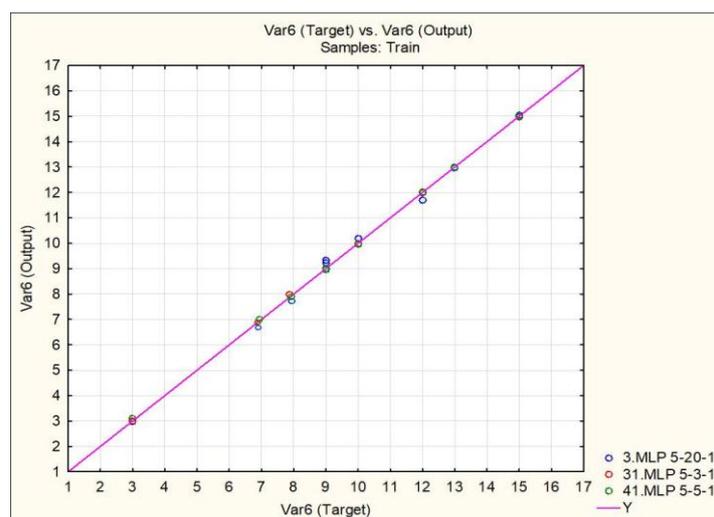


Рис. 2. Распределение выходных и целевых значений, полученных в программном продукте «STATISTICA Application 10»

По результатам нейросетевого моделирования можно сделать вывод, что значимым также является параметр плотности ОТВ (Var 1). Зависимость времени тушения (Var 6) от плотности (Var 1) и коэффициента поверхностного натяжения (Var 2) описывается полиномиальной функцией (рис. 3).

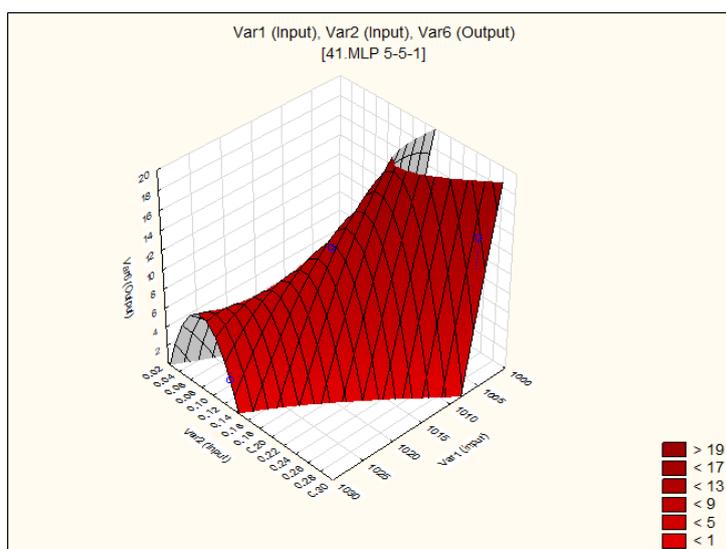


Рис. 3. Зависимость времени тушения (Var 6) от плотности (Var 1) и коэффициента поверхностного натяжения (Var 2)

Результаты математического моделирования в программе «REGRAN»

В процессе моделирования были определены коэффициенты парной корреляции между факторами табл. 4.

Таблица 4

Коэффициенты парной корреляции $x_1 \div x_5$ в программном продукте «REGRAN»

x	1	2	3	4	5
1	1,00	-0,637	-0,182	0,652	0,637
2	-0,637	1,00	0,677	-0,962	-0,501
3	-0,182	0,677	1,00	-0,697	-0,529
4	0,652	-0,962	-0,686	1,00	0,643
5	0,637	-0,501	-0,529	0,643	1,00

В результате регрессионного анализа получены следующие адекватные модели:

$$y_1 = 3,185x_1x_2^2 - 45,85x_1^2\sqrt{x_2}x_3 + 58,66x_1^{1,5}\sqrt{x_2x_3} \quad (F=16,1; \Delta_1=1,38). \quad (1)$$

Была определена значимость факторов: $x_1 = -100\%$; $x_2 = -14\%$; $x_3 = -16\%$.

Наиболее значимыми для параметра y оказались входные факторы X1 (плотность) и X3 (динамическая вязкость).

$$y_2 = 37,10x_1 - 44,05x_1x_3 + 40,68\sqrt{x_1}x_3 - 33,74x_1\sqrt{x_2}, \quad (F=95,8; \Delta_2=0,52). \quad (2)$$

Значимость факторов: $x_1 = -100\%$; $x_2 = -30\%$; $x_3 = -11\%$.

Для наглядной оценки точности регрессионных моделей (1), (2) пересчитанные по ним величины параметра y приведены в табл. 5.

Таблица 5

Оценка точности моделей, построенных в программном продукте «REGRAN»

№	y	y_1	y_2
1	8	8,145	7,876
2	10	11,21	9,655
3	12	10,62	12,52
4	9	8,44	8,927
5	9	9,075	8,649
6	7	7,55	7,304
7	3	2,865	3,132
8	13	12,39	12,9
9	15	15,5	15,02

Результаты регрессионного анализа демонстрируют адекватность уравнений (1), (2) и высокую значимость плотности (x_1) и коэффициента поверхностного натяжения ОТВ (x_2) и динамической вязкости (x_3) в значениях времени тушения компонентов ПВВ на примере персульфата калия. На рис. 4 приведены зависимости времени тушения модельного очага от концентрации и гелеобразователя по результатам экспериментальных исследований и моделирования. Минимальное расхождение модельных значений с экспериментальными выявлено при использовании уравнения (2), максимальная погрешность достигнута в уравнении (1) и составляет 4,4 %.

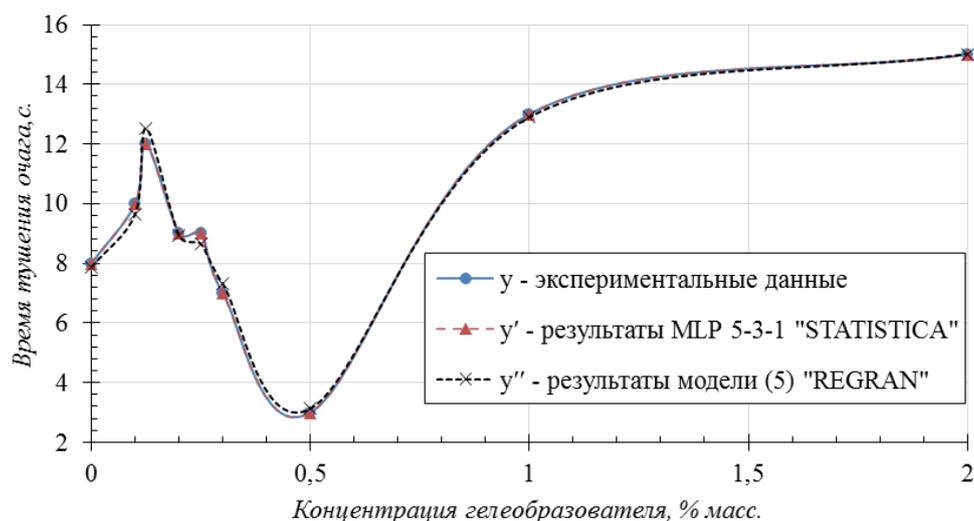


Рис. 4. Распределение экспериментальных данных и результатов моделирования

Полученные результаты позволили сформулировать рекомендации для создания ОТВ на основе ВГС для пожаротушения компонентов ПВВ с оптимальными концентрациями гелеобразователя 0,4–0,5 масс. %, обеспечивающие необходимые физические свойства огнетушащих составов.

Выводы

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Получены адекватные уравнения регрессии при незначительном количестве экспериментальных данных.

2. Результаты регрессионного анализа программ «REGRAN» и «STATISTICA» коррелируются между собой по влиянию фактора x_1 (плотность) на y (время тушения). Выявлена значимость факторов x_2 (коэффициент поверхностного натяжения) и x_3 (коэффициент динамической вязкости) на изменение времени тушения компонента ПВВ.

3. Значимость факторов x_3 (динамическая вязкость) и x_1 (плотности) на выходной параметр была выявлена благодаря нейросетевому моделированию и подтверждается экспериментальными данными.

4. При создании рецептур водногелевых огнетушащих составов для ликвидации пожаров с наличием ПВВ и их компонентов прежде всего необходимо учитывать концентрации компонентов ОТВ, обеспечивающих определенные значения плотности, коэффициентов поверхностного натяжения и динамической вязкости ОТВ.

Список источников

1. Бучельников Д.Ю., Бучельников С.Ю. Тушение пожаров на объектах с наличием взрывчатых веществ и материалов: учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: филиал Акад. ГПС МЧС России, 2002. 64 с.

2. Власов Д.А. Взрыв и его последствия: учеб. пособие. СПб.: С.-Петерб. гос. технол. ин-т (техн. ун-т), 2001. 151 с.

3. High-power acoustic fire extinguisher with artificial intelligence platform / J. Wilk-Jakubowski [et al.] // International Journal of Computational Vision and Robotics. 2022. Vol. 12. № 3. P. 236–249.

4. Use of fire-extinguishing balls for a conceptual system of drone-assisted wildfire fighting / B. Aydin [et al.] // Drones. 2019. Vol. 3. № 1. С. 17.

5. Воронцов Т.С., Иванов А.В. Исследование физико-химических свойств водногелевых огнетушащих составов в условиях ликвидации горения промышленных взрывчатых веществ и их компонентов // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2022. № 2 (43). С. 50–58.

6. Михайлова В.И., Скрипник И.Л., Иванов А.В. Моделирование систем орошения резервуаров нефтепродуктов в условиях применения модифицированных водногелевых составов // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2019. № 4. С. 51–60.

7. Исследование огнетушащих и теплозащитных свойств водногелевых составов на основе модифицированных наножидкостей / Ш.Г. Гаджиев [и др.] // *Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России»*. 2014. № 2. С. 31–37.

8. Исследование огнетушащих свойств воды и гидрогелей с углеродными наноструктурами при ликвидации горения нефтепродуктов / А.В. Иванов [и др.] // *Пожаровзрывобезопасность*. 2017. Т. 26. № 8. С. 31–44.

9. Боровиков В.П. Нейронные сети STATISTICA Neural Networks: методология и технология современного анализа данных. М.: Изд-во Горячая Линия-Телеком, 2008. 392 с.

10. Таранцев А.А. Принципы построения регрессионных моделей при исходных данных с нечетким описанием // *Автоматика и телемеханика*. 1997. № 11. С. 215–219.

11. Nirakhi S. Potential use of artificial neural network in data mining // *The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*. 2010. Т. 2. Р. 339–343.

12. Sadeghi-Naini A., Asgary A. Modeling number of firefighters responding to an incident using artificial neural networks // *International Journal of Emergency Services*. 2013. Vol. 2. № 2. Р. 104–118.

13. Способ и устройство управления физико-химическими процессами в веществе и на границе раздела фаз: пат. 2479005 Рос. Федерация / Г.К. Ивахнюк, В.Н. Матюхин, В.А. Клачков, А.О. Шевченко, А.С. Князев, К.Г. Ивахнюк, А.В. Иванов, В.А. Родионов. – № 2011118347/08; заявл. 21.01.2010; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10.

14. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Dmitrak Yu.V. Analysis of hazardous processes in the natural-industrial system // *Advances in raw material industries for sustainable development goals*. CRC Press, 2020. P. 422–429.

15. Nutrient requirement equations for Indian goat by multiple regression analysis and least cost ration formulation using a linear and non-linear stochastic model / V. Patil [et al.] // *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2022. Vol. 106. № 5. P. 968–977.

16. Bohidar N.R., Restaino F.A., Schwartz J.B. Selecting key pharmaceutical formulation factors by regression analysis // *Drug Development and Industrial Pharmacy*. 1979. Vol. 5. № 2. P. 175–216.

References

1. Buchel'nikov D.Yu., Buchel'nikov S.Yu. Tushenie pozharov na ob"ektah s nalichiem vzryvchatyh veshchestv i materialov: ucheb.-metod. posobie. Ekaterinburg: filial Akad. GPS MCHS Rossii, 2002. 64 s.

2. Vlasov D.A. Vzryv i ego posledstviya: ucheb. posobie. SPb.: S.-Peterb. gos. tekhnol. in-t (tekhn. un-t), 2001. 151 s.

3. High-power acoustic fire extinguisher with artificial intelligence platform / J. Wilk-Jakubowski [et al.] // *International Journal of Computational Vision and Robotics*. 2022. Vol. 12. № 3. P. 236–249.

4. Use of fire-extinguishing balls for a conceptual system of drone-assisted wildfire fighting / B. Aydin [et al.] // *Drones*. 2019. Vol. 3. № 1. S. 17.

5. Voroncov T.S., Ivanov A.V. Issledovanie fiziko-himicheskikh svojstv vodnogelevykh oagnetushashchih sostavov v usloviyah likvidacii goreniya promyshlennykh vzryvchatyh veshchestv i ih komponentov // *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*. 2022. № 2 (43). S. 50–58.

6. Mihajlova V.I., Skripnik I.L., Ivanov A.V. Modelirovanie sistem orosheniya rezervuarov nefteproduktov v usloviyah primeneniya modificirovannykh vodnogelevykh sostavov // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2019. № 4. S. 51–60.
7. Issledovanie ognetchashchih i teplozashchitnykh svoystv vodnogelevykh sostavov na osnove modificirovannykh nanozhidkostey / Sh.G. Gadzhiev [i dr.] // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2014. № 2. S. 31–37.
8. Issledovanie ognetchashchih svoystv vody i gidrogelej s uglerodnymi nanostrukturami pri likvidacii goreniya nefteproduktov / A.V. Ivanov [i dr.] // Pozharovzryvobezopasnost'. 2017. T. 26. № 8. S. 31–44.
9. Borovikov V.P. Neironnye seti STATISTICA Neural Networks: metodologiya i tekhnologiya sovremennogo analiza dannykh. M.: Izd-vo Goryachaya Liniya-Telekom, 2008. 392 s.
10. Tarancev A.A. Principy postroeniya regressionnykh modelej pri iskhodnykh dannykh s nechetkim opisaniem // Avtomatika i telemekhanika. 1997. № 11. S. 215–219.
11. Nirakhi S. Potential use of artificial neural network in data mining // The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE). IEEE, 2010. T. 2. P. 339–343.
12. Sadeghi-Naini A., Asgary A. Modeling number of firefighters responding to an incident using artificial neural networks // International Journal of Emergency Services. 2013. Vol. 2. № 2. P. 104–118.
13. Sposob i ustrojstvo upravleniya fiziko-himicheskimi processami v veshchestve i na granice razdela faz: pat. 2479005 Ros. Federaciya / G.K. Ivahnyuk, V.N. Matyuhin, V.A. Klachkov, A.O. Shevchenko, A.S. Knyazev, K.G. Ivahnyuk, A.V. Ivanov, V.A. Rodionov. – № 2011118347/08; zayavl. 21.01.2010; opubl. 10.04.2013, Byul. № 10.
14. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Dmitrak Yu.V. Analysis of hazardous processes in the natural-industrial system // Advances in raw material industries for sustainable development goals. CRC Press, 2020. P. 422–429.
15. Nutrient requirement equations for Indian goat by multiple regression analysis and least cost ration formulation using a linear and non-linear stochastic model / V. Patil [et al.] // Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition. 2022. Vol. 106. № 5. P. 968–977.
16. Bohidar N.R., Restaino F.A., Schwartz J.B. Selecting key pharmaceutical formulation factors by regression analysis // Drug Development and Industrial Pharmacy. 1979. Vol. 5. № 2. P. 175–216.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 14.02.2024; одобрена после рецензирования: 11.04.2024;
принята к публикации: 06.05.2024

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 14.02.2024; approved after review: 11.04.2024;
accepted for publication: 06.05.2024

Информация об авторах:

Воронцов Тарас Сергеевич, преподаватель кафедры пожарно-строевой, физической подготовки и газодымозащитной службы Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (153040, г. Иваново, пр. Строителей, д. 33), e-mail: taras.chek@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8474-0478>, SPIN-код: 3730-9590

Иванов Алексей Владимирович, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: ivanov.av@igps.ru, SPIN-код: 6886-9928

Information about authors:

Vorontsov Taras S., teacher of the department of firefighting, physical training and gas and smoke protection service of the Ivanovo fire and rescue academy of State fire service of EMERCOM of Russia (153040, Ivanovo, pr. Stroiteley, 33), e-mail: taras.chek@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8474-0478>, SPIN: 3730-9590

Ivanov Aleksey V., associate professor of the department of security service of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: ivanov.av@igps.ru, SPIN: 6886-9928