

Научная статья

УДК 614.841.4; 614.844; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-1-55-69

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОБОБЩЕННОГО КРИТЕРИЯ ВЫБОРА БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА ДЛЯ ОСНАЩЕНИЯ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ МЧС РОССИИ

✉ Сьтдыков Максим Равильевич;

Остапова Мария Викторовна;

Сильников Никита Михайлович.

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

✉ sytdykov@igps.ru

Аннотация. Представлено научное обоснование обобщенного критерия выбора беспилотного воздушного судна вертолетного типа для оснащения подразделений МЧС России с целью повышения эффективности выполнения оперативных задач при ликвидации чрезвычайных ситуаций. Авторами разработан комплексный методологический подход, интегрирующий метод экспертной оценки с привлечением пяти специалистов, непосредственно занимающихся техническим обслуживанием и применением беспилотных воздушных судов вертолетного типа, метод анализа размерностей для формирования безразмерных комплексных показателей, а также аппарат нечеткой логики на базе системы нечеткого вывода Мамдани в программной среде математического моделирования MatLab. В рамках исследования проведено анкетирование экспертов для определения значимости технических параметров беспилотных воздушных судов вертолетного типа, рассчитан коэффициент конкордации Кендалла, подтверждающий высокую степень согласованности мнений специалистов, определены весовые коэффициенты параметров и средневзвешенные оценки шести образцов беспилотных воздушных судов вертолетного типа. Сформирован обобщенный показатель эффективности на основе интеграции показателя технической эффективности и средневзвешенной оценки. Результаты исследования позволили классифицировать рассматриваемые образцы беспилотных воздушных судов вертолетного типа по уровням эффективности и могут быть использованы при выборе перспективных образцов для оснащения подразделений МЧС России.

Ключевые слова: беспилотные воздушные судна вертолетного типа, обобщенного критерия выбора, обобщенный показатель эффективности, метод экспертной оценки и анализа размерностей

Для цитирования: Сьтдыков М.Р., Остапова М.В., Сильников Н.М. Научное обоснование обобщенного критерия выбора беспилотного воздушного судна вертолетного типа для оснащения подразделений МЧС России // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 1. С. 55–69. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-1-55-69

Scientific article

SCIENTIFIC SUBSTANTIATION OF THE GENERALIZED CRITERION FOR CHOOSING AN UNMANNED HELICOPTER-TYPE AIRCRAFT FOR EQUIPPING THE UNITS OF EMERCOM OF RUSSIA

✉ Sytdykov Maxim R.;

Ostapova Maria V.;

Silnikov Nikita M.

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

✉ sytdykov@igps.ru

Abstract. The article presents a scientific justification for a generalized criterion for choosing an unmanned helicopter-type aircraft for equipping units of EMERCOM of Russia in order to improve the efficiency of operational tasks in emergency situations. The authors have developed a comprehensive methodological approach that integrates an expert assessment method involving five specialists directly involved in the maintenance and use of helicopter-type unmanned aircraft, a dimensional analysis method for the formation of dimensionless complex indicators, as well as a fuzzy logic apparatus based on the Mamdani fuzzy inference system in the MatLab mathematical modeling software environment. As part of the study, a survey of experts was conducted to determine the significance of the technical parameters of helicopter-type unmanned aircraft, the Kendall concordance coefficient was calculated, confirming a high degree of consistency of experts' opinions, the weighting coefficients of the parameters and weighted average estimates of six samples of helicopter-type unmanned aircraft were determined. A generalized efficiency indicator has been formed based on the integration of the technical efficiency indicator and a weighted average estimate. The results of the study made it possible to classify the considered samples of helicopter-type unmanned aircraft by efficiency levels and can be used in the selection of promising samples for equipping units of the Russian Ministry of Emergency Situations.

Keywords: helicopter-type unmanned aircraft, generalized selection criteria, generalized efficiency indicator, method of expert assessment and dimensional analysis

For citation: Sytdykov M.R., Ostapova M.V., Silnikov N.M. Scientific substantiation of the generalized criterion for choosing an unmanned helicopter-type aircraft for equipping the units of EMERCOM of Russia // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 1. P. 55–69. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-1-55-69

Введение

В настоящее время беспилотные воздушные суда (БВС) активно применяются в мировой практике для решения широкого спектра задач в области обеспечения безопасности и реагирования на чрезвычайные ситуации (ЧС), в том числе территориальными органами и специальными воинскими формированиями МЧС России.

Зарубежные исследования демонстрируют эффективность применения БВС при мониторинге лесных пожаров, поисково-спасательных операциях, оценке последствий стихийных бедствий и обследовании труднодоступных территорий [1, 2]. Работа [3] показала, что применение БВС при обнаружении и мониторинге лесных пожаров позволяет сократить время реагирования на 35–40 % по сравнению с традиционными методами наблюдения. Исследования [4] подтверждают высокую эффективность использования мультироторных БВС при проведении поисково-спасательных операций в условиях ограниченной видимости и сложного рельефа местности.

В европейских странах активно развивается направление интеграции БВС в системы экстренного реагирования. Согласно исследованиям [5], в странах Европейского союза более 60 % подразделений пожарной охраны используют БВС для разведки и мониторинга ЧС. Особое внимание уделяется разработке методик оценки эффективности применения БВС различных типов в зависимости от характера решаемых задач [6].

Анализ отечественных исследований показывает, что в территориальных органах и специальных воинских формированиях МЧС России БВС используются для контроля и мониторинга территорий, проведения разведки при пожарах на различных объектах, включая опасные производственные объекты, которые являются наиболее уязвимыми с точки зрения пожарной опасности [7–9]. Работа [10] демонстрирует перспективность применения БВС для оценки обстановки на крупных пожарах и координации действий подразделений. В статье [11] обоснованы преимущества использования БВС в скорости реагирования, маневренности, экономической эффективности и отсутствии риска для непосредственных исполнителей при реагировании на природные пожары в горной местности. Исследования [12] посвящены анализу технических характеристик БВС, применяемых в подразделениях МЧС России, и выявлению основных направлений совершенствования их тактико-технических параметров.

Вместе с тем, анализ научных публикаций выявляет ряд нерешенных проблем. Работа [13] указывает на отсутствие единых методических подходов к выбору оптимального типа БВС для конкретных условий применения в подразделениях МЧС России. Отмечается, что существующие методики оценки эффективности БВС часто ограничиваются анализом отдельных технических характеристик без комплексного учета специфики оперативных задач и мнений специалистов-практиков.

Анализ отечественных и зарубежных исследований показывает, что, несмотря на активное развитие теоретических и практических аспектов применения БВС в системах обеспечения безопасности, существует научная проблема, заключающаяся в отсутствии комплексного научно обоснованного критерия выбора беспилотных воздушных судов вертолетного типа (БВСВ) для подразделений МЧС России, который бы интегрировал:

- технические характеристики БВСВ на основе безразмерных комплексных показателей;
- экспертные оценки специалистов-практиков, непосредственно эксплуатирующих данную технику;
- аппарат нечеткой логики для учета неопределенности и интеграции разнородных показателей.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки такого комплексного критерия, который обеспечит объективность и обоснованность принятия решений при оснащении подразделений МЧС России перспективными образцами БВСВ, что в конечном итоге повысит эффективность выполнения оперативных задач при ликвидации ЧС и позволит оптимизировать использование бюджетных средств.

Таким образом, целью исследования является разработка научно обоснованного обобщенного критерия выбора БВСВ для оснащения подразделений МЧС России на основе интеграции методов экспертной оценки, анализа размерностей и нечеткой логики. Задачи исследования:

- провести экспертную оценку значимости технических параметров БВСВ с привлечением специалистов-практиков и рассчитать средневзвешенную оценку образцов БВСВ;
- сформировать обобщенный критерий выбора БВСВ с применением аппарата нечеткой логики и системы нечеткого вывода Мамдани в программной среде MatLab;
- провести классификацию рассматриваемых образцов БВСВ по уровням эффективности на основе разработанного критерия.

Метод исследования

Отдельного внимания заслуживают исследования по применению метода анализа размерностей для формирования обобщенных показателей эффективности технических систем. Работы [14, 15] заложили теоретические основы π -теоремы и ее применения в инженерных расчетах. Современные исследования [12, 16] демонстрируют эффективность метода анализа размерностей при формировании безразмерных комплексов для оценки пожарно-технического оборудования.

Переход от размерных параметров к безразмерным критериям решает проблему соизмеримости, но не отвечает на вопрос: какой критерий важнее? Для определения весовых коэффициентов критериев применяются методы экспертного оценивания [17].

Зарубежный и отечественный опыт применения многокритериального анализа для выбора БВС представлен в работах [18, 19], где используются методы анализа иерархий и TOPSIS. Однако данные подходы не в полной мере учитывают неопределенность и нечеткость исходных данных, характерную для оценки сложных технических систем в условиях ЧС.

Применение аппарата нечеткой логики для решения задач многокритериального выбора технических систем активно развивается в последние годы. Исследования [20], заложившие основы теории нечетких множеств, получили широкое развитие в работах отечественных ученых [21]. Так, например, в работе [22] разработаны методологические основы применения нечеткой логики для принятия решений в условиях неопределенности, в работе [23] показана эффективность применения систем нечеткого вывода типа Мамдани для решения задач оценки и выбора сложных технических объектов. Зарубежные исследования [24, 25] подтверждают высокую результативность нечетко-логических методов при интеграции количественных и качественных показателей.

В контексте оценки эффективности БВС применение нечеткой логики представлено в работе [26], где разработана система нечеткого вывода для выбора оптимального типа беспилотного летательного аппарата при проведении мониторинга сельскохозяйственных территорий. В исследовании [27] применен гибридный подход, сочетающий метод экспертных оценок и нечеткую логику, для ранжирования БВС по степени пригодности для различных климатических условий. Однако указанные работы не охватывают специфику применения БВС в условиях ЧС и не учитывают особенности эксплуатации в подразделениях МЧС России.

Результаты исследования и их обсуждение

В работе [12] по перечню основных технических параметров БВСВ, влияющих на их работоспособность, сформированы первичные безразмерные комплексные показатели и вторичный обобщенный показатель технической эффективности БВСВ $\pi_{\text{БВСВ}}$.

В табл. 1 представлены результаты расчета обобщенного комплексного показателя для БВСВ, применяемых в МЧС России.

Таблица 1

Численные значения обобщенного комплексного показателя технической эффективности БВСВ

№ п/п	Наименование образца БВСВ	$\pi_{\text{БВСВ}}$
1	Гранд ВА-1000	0,05
2	DJI Inspire 1	11,91
3	DJI mavic 3	13,73
4	Phantom 3 advanced	3,69
5	ТБ-29В	2,32
6	Ка-137	8,59

По результатам, представленным в табл. 1, наиболее эффективным образцом БВСВ является образец с наибольшим численным значением $\pi_{\text{БВСВ}}$, а именно образец № 3 – DJI mavic 3 [12].

Для дальнейшего формирования обобщенного критерия выбора БВСВ методом экспертной оценки рассчитана средневзвешенная оценка каждого образца. С этой целью определен наиболее значимый параметр технической эффективности БВСВ. При расчете методом экспертной оценки проведено анкетирование пяти специалистов [28], которые непосредственно связаны с техническим обслуживанием и применением БВСВ при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ.

Специалисты определили значимость каждого технического параметра, влияющего на работоспособность БВСВ, и поставили ранги от 1 до 7, где рангу 1 соответствует самый важный параметр, а рангу 7 – наименее важный. В случае, если эксперт считает параметры равноценными, то их значение определяется как среднее их суммы. Первичная матрица опроса представлена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица опроса экспертов

№ п/п	Наименование параметра	Ранги							
		№ эксперта					Сумма рангов	Разность суждений	Квадрат разности суждений
		1	2	3	4	5			
1	Потребляемая мощность	6	5	5,5	6,5	6,5	29,5	9,5	90
2	Размер по диагонали	7	7	7	6,5	6,5	34	14,0	196
3	Длительность полета	1	4	2,5	1,5	1	10	-10,0	100
4	Дальность полета	2,5	2	2,5	1,5	2	10,5	-9,5	90
5	Максимальная скорость	4	2	2,5	4	3	15,5	-4,5	20
6	Максимальная высота полета	2,5	2	2,5	4	4,5	15,5	-4,5	20
7	Максимальная взлетная масса	5	6	5,5	4	4,5	25	5,0	25
Сумма		28	28	28	28	28	140		542

С целью дальнейшей возможности использования данных, представленных в табл. 2, определена согласованность мнений экспертов. Вычислен коэффициент конкордации Кендалла W , значения которого меняются в пределах от 0 до 1. Если $W=0$, то ранжировки в матрицах считаются несогласованными, если W стремится к 1 – матрица согласована [29].

Вычисление коэффициента конкордации производится по формуле (1):

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (n^3 - n) - m \cdot \sum_{i=1}^m T_i}, \quad (1)$$

где m – количество экспертов; n – количество параметров; S – сумма квадратов разностей суждений (отклонений от среднего); T_i – поправочный коэффициент для i -й переменной, вычисляется по формуле (2):

$$T_i = \frac{1}{12} \cdot \sum_{y=1}^i (t_y^3 - t_y), \quad (2)$$

где t_i – число неразличимых объектов «одного» случая. Если связанные ранги отсутствуют, то поправочный коэффициент равен 0.

$$T_1 = (2^3 - 2) = 6;$$

$$T_2 = (3^3 - 3) = 24;$$

$$T_3 = (4^3 - 4) + (2^3 - 2) = 66;$$

$$T_4 = (2^3 - 2) + (2^3 - 2) + (3^3 - 3) = 36;$$

$$T_5 = (2^3 - 2) + (2^3 - 2) = 12;$$

$$\sum_{i=1}^m T_i = 12;$$

$$W = \frac{12 \cdot 542}{5^2 \cdot (7^3 - 7) - 5 \cdot 12} = 0,780.$$

Полученное численное значение коэффициента конкордации имеет высокую степень согласованности мнений экспертов и адекватное использование при дальнейшем исследовании.

На основании исходных данных опроса (табл. 2) проведен математический анализ методами средних арифметических и медиан рангов [30], результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета рангов

№ п/п	Наименование параметров	Среднее арифметическое рангов	Итоговый ранг по среднему арифметическому	Медианы рангов	Итоговый ранг по медианам	Итоговый ранг
1	Потребляемая мощность	5,9	6	6	6	6
2	Размер по диагонали	6,8	7	7	7	7
3	Длительность полета	2	1	1,5	1	1
4	Дальность полета	2,1	2	2	2	2
5	Максимальная скорость	3,1	3,5	3	4	4
6	Максимальная высота полета	3,1	3,5	2,5	3	3
7	Максимальная взлетная масса	5	5	5	5	5

В соответствии с полученными результатами (табл. 3) наиболее значимым параметром, является параметр № 3. Для подтверждения или опровержения данного факта, определены весовые коэффициенты каждого параметра (табл. 4) для дальнейшего расчета средневзвешенной оценки.

Таблица 4

Весовые коэффициенты технических параметров БВСВ

№ п/п	Наименование показателей	Эксперты					Σ	Вес λ
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5		
1	Потребляемая мощность	1	2	1,5	0,5	0,5	5,5	0,0495
2	Размер по диагонали	0	0	0	0,5	0,5	1	0,0090
3	Длительность полета	6	3	4,5	5,5	6	25	0,2252
4	Дальность полета	4,5	5	4,5	5,5	5	24,5	0,2207
5	Максимальная скорость	3	5	4,5	3	4	19,5	0,1757
6	Максимальная высота полета	4,5	5	4,5	3	2,5	19,5	0,1757
7	Максимальная взлетная масса	2	1	1,5	9	2,5	16	0,1441
Итого							111	

Данные, представленные в табл. 4, подтверждают, что наиболее значимым параметром является параметр № 3, так как имеет наибольший весовой коэффициент равный 0,2252.

На основании технических характеристик БВСВ, взятых на официальных интернет-сайтах заводов производителей, рассчитана средневзвешенная оценка каждого рассматриваемого образца БВСВ. Результаты расчета представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчеты средневзвешенной оценки БВСВ

№ п/п	Наименование образца БВСВ	Средневзвешенная оценка
1	Гранад ВА-1000	4,536
2	DJI Inspire 1	3,571
3	DJI Mavic 3	2,750
4	Phantom 3 advanced	2,964
5	ТБ-29В	3,536
6	Ка-137	3,643

На основании расчета средневзвешенной оценки определен наиболее эффективный образец БВСВ, им является DJI Mavic 3, обладающий наименьшим численным значением.

Для определения критерия выбора БВСВ предлагается сформировать обобщенный показатель эффективности (ОПЭ) рассматриваемых образцов с применением аппарата нечеткой логики и математического программного обеспечения MatLab [16]. Для этого в среде математического моделирования заданы входные данные в виде двух параметров: $\lambda_{\text{БВСВ}}$ P_i и средневзвешенной оценки $SrVz$, а также выходной параметр ОПЭ, представляющий собой ОПЭ или обобщенный критерий выбора.

В работе использована система нечеткого вывода Мамдани, так как значения входных и выходных переменных заданы нечеткими множествами [23–25]. Для сглаживания переходов ввиду входного нечеткого диапазона термы, соответственно, определенных по четырем точкам, использована трапециевидная функция принадлежности входных и выходных переменных. Интерфейс системы нечеткого вывода представлен на рис. 1.

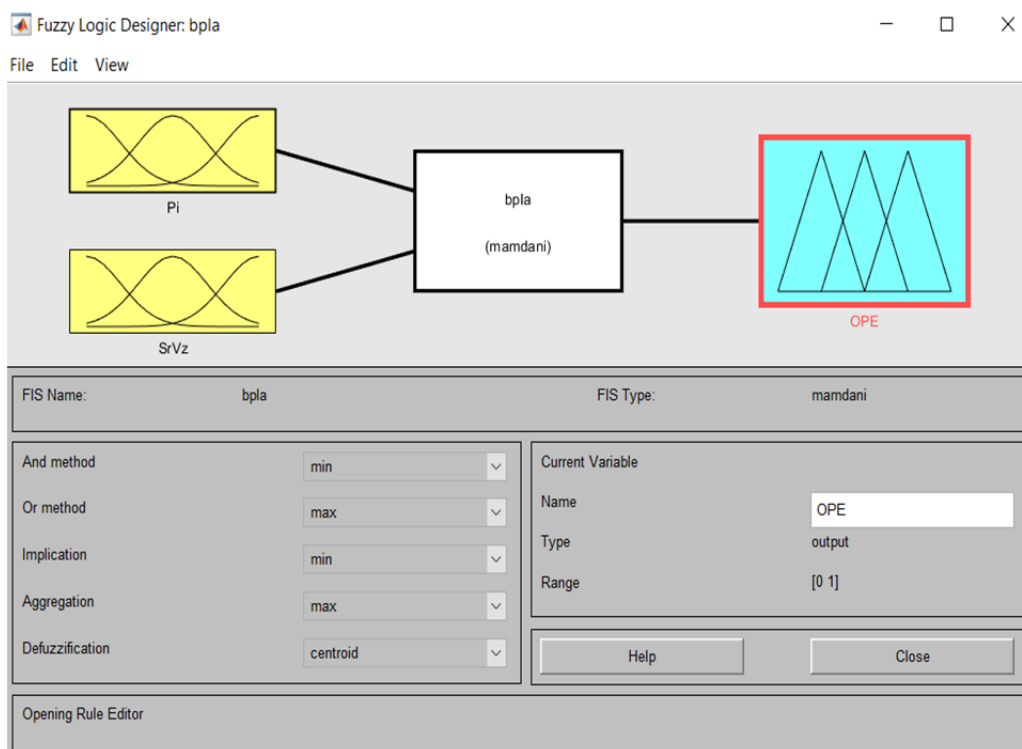


Рис. 1. Графический интерфейс системы нечеткого вывода с заданными параметрами

Оценка эффективности задана интервалами в виде шкалы градации: «наивысшая эффективность», «высокая эффективность», «умеренная эффективность», «низкая эффективность». Для каждой шкалы заданы определенные интервалы, основанные на численных значениях входных параметров для каждого образца (рис. 2).

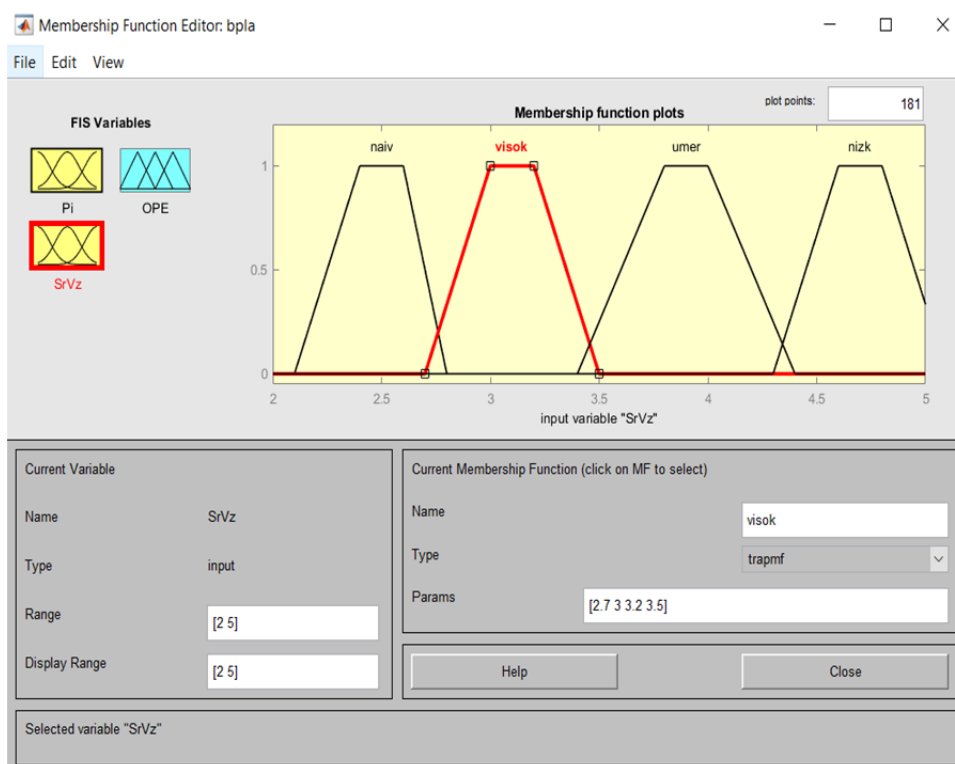


Рис. 2. Функция принадлежности для входного параметра Pi на интервале «Высокая эффективность»

База правил, сформированная для ОПЭ, представлена на рис. 3.

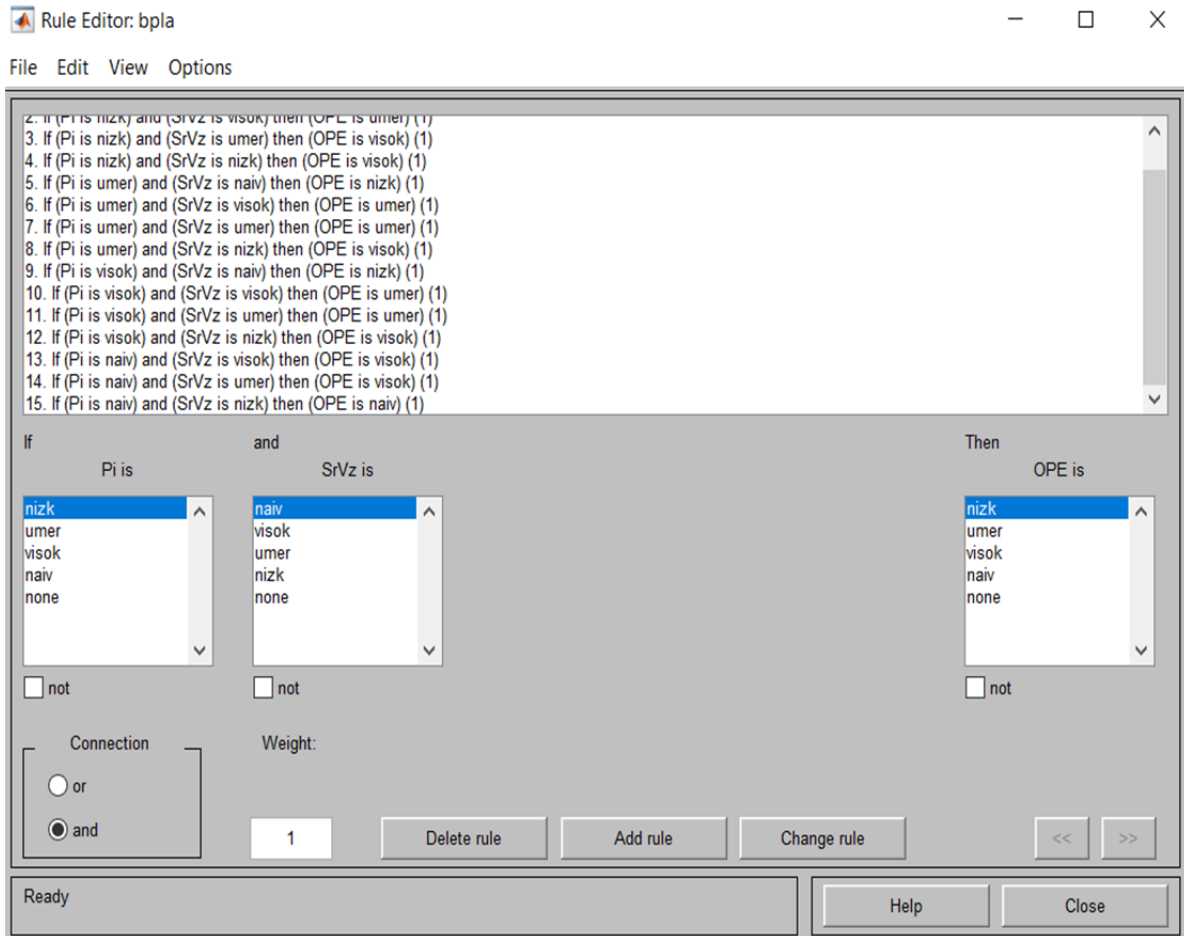


Рис. 3. Редактор правил ОПЭ

Сформированные правила позволили выполнить расчет результатов нечеткого вывода для конкретных значений входных переменных. Результаты вычислений ОПЭ для каждого рассмотренного образца БВСВ представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты вычисления ОПЭ БВСВ

№ п/п	Наименование образца БВСВ	Численное значение ОПЭ
1	Гранад ВА-1000	0,500
2	DJI Inspire 1	0,540
3	DJI Mavic 3	0,542
4	Phantom 3 advanced	0,256
5	ТБ-29В	0,542
6	Ка-137	0,257

Для более подробного анализа модели нечеткого вывода представлены графики поверхностей нечеткого вывода зависимости ОПЭ от входных параметров, заданных на этапе их ввода в виде трапециевидных функций принадлежности.

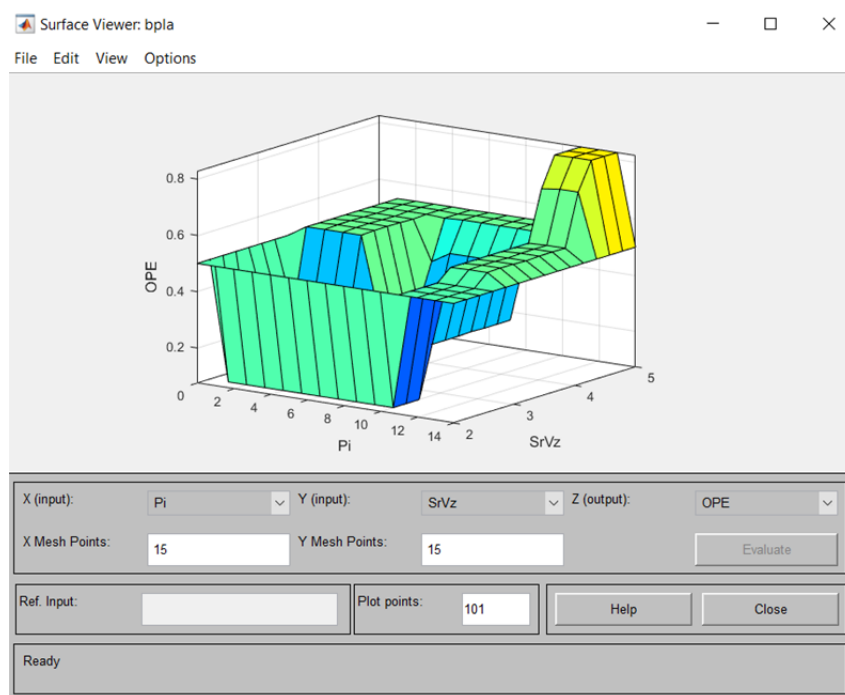


Рис. 4. Поверхность нечеткого вывода зависимости ОПЭ от $\pi_{\text{БВСВ}}$ и средневзвешенной оценки

Представленная на рис. 4 поверхность нечеткого вывода отражает прямую зависимость ОПЭ от $\pi_{\text{БВСВ}}$ и обратную зависимость от средневзвешенной оценки. При значениях $\pi_{\text{БВСВ}}$, стремящимся к максимальному численному значению 14, заданным на этапе ввода входных параметров, и минимальном численном значении 2 средневзвешенной оценки, показатель ОПЭ наибольший, что подтверждает прямо- и обратнопропорциональную зависимости.

Результаты комплексной оценки технической эффективности БВСВ, проведенной методами экспертной оценки, анализа размерностей и математического моделирования на основе нечетких множеств представлены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты комплексной оценки технической эффективности БВСВ

№ п/п	БВСВ	Средневзвешенная оценка	Численное значение $\pi_{\text{БВСВ}}$	ОПЭ	Эффективность
1	DJI Mavic 3	2,750	13,73	0,542	высокая
2	ТБ-29В	3,536	2,32	0,542	высокая
3	DJI Inspire 1	3,571	11,91	0,540	высокая
4	Гранад ВА-1000	4,536	0,05	0,500	высокая
5	Ка-137	3,643	8,59	0,257	умеренная
6	Phantom 3 advanced	2,964	3,69	0,256	умеренная

Анализируя данные, представленные в табл. 7, видно, что высокую техническую эффективность имеют БВСВ с товарными названиями «DJI Mavic 3», «ТБ-29В», «DJI Inspire 1» и «Гранад ВА-1000», в то время как БВСВ «Ка-137» и «Phantom 3 advanced» находятся в интервале умеренной эффективности.

Заключение

В результате проведенного исследования решены следующие задачи:

1. Проведена экспертная оценка значимости технических параметров БВСВ с привлечением пяти специалистов-практиков. Расчет коэффициента конкордации Кендалла, равный $W=0,77$, подтвердил высокую степень согласованности мнений экспертов, что обеспечивает достоверность результатов. Определены весовые коэффициенты параметров и средневзвешенные оценки шести образцов БВСВ, при этом наиболее значимым параметром признана длительность полета ($\lambda = 0,2252$).

2. Сформирован обобщенный критерий выбора БВСВ на основе интеграции показателя технической эффективности $\pi_{\text{БВСВ}}$ и средневзвешенной экспертной оценки с применением аппарата нечеткой логики и системы нечеткого вывода Мамдани в программной среде MatLab. Разработана база правил нечеткого вывода и построены поверхности зависимости ОПЭ от входных параметров, подтверждающие прямую зависимость от показателя технической эффективности и обратную – от средневзвешенной оценки.

3. Проведена классификация шести рассматриваемых образцов БВСВ по уровням эффективности. Установлено, что четыре образца («DJI Mavic 3», «ТБ-29В», «DJI Inspire 1», «Гранад ВА-1000») демонстрируют высокую эффективность (ОПЭ от 0,500 до 0,542), два образца («Ка-137», «Phantom 3 advanced») – умеренную эффективность (ОПЭ $\approx 0,256-0,257$).

Научная новизна полученных результатов заключается в разработке комплексного методологического подхода к формированию обобщенного критерия выбора БВСВ, интегрирующего метод анализа размерностей для формирования безразмерных комплексных показателей технической эффективности, метод экспертной оценки с количественной оценкой согласованности мнений специалистов-практиков и аппарат нечеткой логики на базе системы Мамдани для синтеза разнородных количественных и качественных показателей в единый обобщенный критерий.

Данный подход, в отличие от существующих методик, позволяет учитывать не только технические характеристики БВСВ, но и экспертные оценки специалистов, непосредственно эксплуатирующих данную технику в условиях ЧС, что повышает практическую обоснованность принимаемых решений.

Научно обоснованные рекомендации по использованию результатов:

– разработанный обобщенный критерий может быть применен при формировании технических заданий на закупку перспективных образцов БВСВ для подразделений МЧС России;

– методика комплексной оценки технической эффективности целесообразна для использования при планировании оснащения территориальных органов МЧС России с учетом специфики оперативных задач конкретных регионов;

– результаты классификации образцов БВСВ по уровням эффективности рекомендуются для принятия решений о приоритетности приобретения и модернизации парка БВС.

Основные направления дальнейших исследований включают:

– расширение номенклатуры рассматриваемых образцов БВСВ с включением перспективных зарубежных и отечественных моделей;

– уточнение базы правил нечеткого вывода на основе накопления статистических данных об эксплуатации БВСВ в различных типах ЧС;

– разработку специализированного программного обеспечения для автоматизированного выбора БВСВ с учетом оперативной обстановки и характера решаемых задач;

– исследование влияния климатических и географических факторов на эффективность применения различных образцов БВСВ в условиях различных регионов Российской Федерации.

Список источников

1. An Unmanned Aircraft System for Automatic Forest Fire Monitoring and Measurement / L. Merino [et al.] // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2012. Vol. 65. P. 533–548. DOI: 10.1007/s10846-011-9560-x
2. Erdelj M., Król M., Natalizio E. Wireless Sensor Networks and Multi-UAV systems for natural disaster management // *Computer Networks*. 2017. Vol. 124. P. 72–86. DOI: 10.1016/j.comnet.2017.05.021
3. Yuan C., Zhang Y., Liu Z. A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques // *Canadian Journal of Forest Research*. 2015. Vol. 45. № 7. P. 783–792. DOI: 10.1139/cjfr-2014-0347
4. Homainejad N., Rizos C. Application of multiple categories of Unmanned Aircraft Systems (UAS) in different airspaces for bushfire monitoring and response // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* P: 55–60. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-55-2015
5. Restás Á. Drone Applications for Supporting Disaster Management // *World Journal of Engineering and Technology*. 2015. Vol. 3. P. 316–321. DOI: 10.4236/wjet.2015.33C047
6. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. Vol. 92. P. 79–97. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013
7. Сытдыков М.Р., Иванов А.В., Абдуллаева Ю.С. О вопросах аварийности объектов нефтегазовой промышленности // *Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXVI Междунар. науч.-практ. конф. Москва, 2024*. С. 119–123. EDN NCEJHN.
8. Сытдыков М.Р., Шупнев Д.С., Абдуллаева Ю.С. Анализ аварийности объектов нефтегазодобывающей промышленности // *Современные проблемы обеспечения безопасности: сб. материалов XXVI Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2024*. С. 102–107. EDN TTJMOJ.
9. Сытдыков М.Р., Иванов А.В., Абдуллаева Ю.С. О проблематике тушения пожаров на морских стационарных платформах в Арктической зоне Российской Федерации // *Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: материалы всеросс. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 2025*. С. 8–10. EDN IUYYAA.
10. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Вагнер П. Человечество и пожары. М.: Триада ЛТД, 2007. 141 с.
11. Матвеев А.В., Матиев Р.Т. Принятие решений при пожарах в горной местности: Сравнительный анализ методов мониторинга // *Национальная безопасность и стратегическое планирование*. 2023. № 2 (42). С. 76–90. DOI: 10.37468/2307-1400-2023-2-76-90
12. Сытдыков М.Р., Бесков М.С., Цыганков В.П. Определение оптимального вида беспилотного воздушного судна вертолетного типа для оснащения подразделений МЧС России // *Применение авиационно-спасательных технологий для предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций: сб. трудов секции XXXIV Междунар. науч.-практ. конф. Химки, 2024*. С. 111–116. EDN QVTRMU.
13. Баканов М.О., Анкудинов М.В. Применение беспилотных летательных аппаратов при проведении разведки лесных пожаров // *Новая наука: От идеи к результату*. 2016. № 10-3. С. 12–15. EDN WWRPHL.
14. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.
15. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. 10-е изд. М.: Наука, 1987. 432 с.
16. Сытдыков М.Р., Иванов А.В. Научное обоснование обобщенного критерия выбора средств пожаротушения // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2024. № 4 (72). С. 130–143. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2024-4-130-143
17. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Физматлит, 2017. 256 с.

18. Матиев Р.Т. Методика принятия управленческих решений по выбору способа мониторинга природных пожаров в горной местности // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2023. № 4. С. 169–184. DOI: 10.61260/2218-130X-2024-2023-4-169-184
19. Dalamagkidis K., Valavanis K.P., Piegl L.A. On integrating unmanned aircraft systems into the national airspace system: issues, challenges, operational restrictions, certification, and recommendations. Springer Science & Business Media, 2011. 218 p.
20. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. № 3. P. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
21. Уткин О.В., Матвеев А.В., Нефедьев С.А. Сравнительный анализ методов многокритериальной оценки при отборе кадров в организационных системах // Проблемы теории и практики управления. 2025. № 9. С. 107–123. EDN SWUSOM.
22. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. 2-е изд., стереотип. М.: Горячая линия-Телеком, 2012. 284 с.
23. Зайченко Ю.П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах. Киев: издательский дом «Слово», 2008. 344 с.
24. Mamdani E.H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // International Journal of Man-Machine Studies. 1975. Vol. 7. № 1. P. 1–13. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2
25. Ross T.J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. 3rd ed. Wiley, 2010. 585 p.
26. Şahin B., Yilmaz M. A Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Approach for Selection of Unmanned Aerial Vehicle // Journal of Aeronautics and Space Technologies. 2020. Vol. 13. № 1. P. 7–16.
27. Kumar A., Sharma R. Multi-criteria decision making for UAV selection using fuzzy logic approach // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. Vol. 8. № 9. P. 2278–3075.
28. Рупосов В.Л. Методы определения количества экспертов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 3 (98). С. 286–292.
29. Ромашкина Г.Ф., Татарова Г.Г. Коэффициент конкордации в анализе социологических данных // Социология: Методология, методы, математические модели. 2005. № 20. С. 131–158.
30. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование. М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2011. 486 с.

References

1. An Unmanned Aircraft System for Automatic Forest Fire Monitoring and Measurement / L. Merino [et al.] // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2012. Vol. 65. P. 533–548. DOI: 10.1007/s10846-011-9560-x
2. Erdelj M., Król M., Natalizio E. Wireless Sensor Networks and Multi-UAV systems for natural disaster management // Computer Networks. 2017. Vol. 124. P. 72–86. DOI: 10.1016/j.comnet.2017.05.021
3. Yuan C., Zhang Y., Liu Z. A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques // Canadian Journal of Forest Research. 2015. Vol. 45. № 7. P. 783–792. DOI: 10.1139/cjfr-2014-0347
4. Homainejad N., Rizos C. Application of multiple categories of Unmanned Aircraft Systems (UAS) in different airspaces for bushfire monitoring and response // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. P. 55–60. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-55-2015
5. Restás Á. Drone Applications for Supporting Disaster Management // World Journal of Engineering and Technology. 2015. Vol. 3. P. 316–321. DOI: 10.4236/wjet.2015.33C047
6. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2014. Vol. 92. P. 79–97. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013

7. Sytdykov M.R., Ivanov A.V., Abdullaeva Yu.S. O voprosah avarijnosti ob"ektov neftegazovoj promyshlennosti // Aktual'nye problemy pozharnoj bezopasnosti: materialy XXXVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Moskva, 2024. S. 119–123. EDN NCEJHN.

8. Sytdykov M.R., Shupnev D.S., Abdullaeva Yu.S. Analiz avarijnosti ob"ektov neftegazodobyvayushchej promyshlennosti // Sovremennye problemy obespecheniya bezopasnosti: sb. materialov XXVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Ekaterinburg, 2024. S. 102–107. EDN TTJMOJ.

9. Sytdykov M.R., Ivanov A.V., Abdullaeva Yu.S. O problematike tusheniya pozharov na morskikh stacionarnyh platformah v Arkticheskoj zone Rossijskoj Federacii // Pozharnaya bezopasnost': sovremennye vyzovy. Problemy i puti resheniya: materialy vsereoss. nauch.-prakt. konf., Sankt-Peterburg, 2025. S. 8–10. EDN IUYYAA.

10. Brushlinskij N.N., Sokolov S.V., Vagner P. Chelovechestvo i pozhary. M.: Triada LTD, 2007. 141 s.

11. Matveev A.V., Matiev R.T. Prinyatie reshenij pri pozharah v gornoj mestnosti: Sravnitel'nyj analiz metodov monitoringa // Nacional'naya bezopasnost' i strategicheskoe planirovanie. 2023. № 2 (42). S. 76–90. DOI: 10.37468/2307-1400-2023-2-76-90

12. Sytdykov M.R., Beskov M.S., Cygankov V.P. Opredelenie optimal'nogo vida bespilotnogo vozdushnogo sudna vertoletnogo tipa dlya osnashcheniya podrazdelenij MCHS Rossii // Primenenie aviacionno-spatatel'nyh tekhnologij dlya preduprezhdeniya i likvidacii chrezvychajnyh situacij: sb. trudov sekcii HXXIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Himki, 2024. S. 111–116. EDN QVTRMU.

13. Bakanov M.O., Ankudinov M.V. Primenenie bespilotnyh letatel'nyh apparatov pri provedenii razvedki lesnyh pozharov // Novaya nauka: Ot idei k rezul'tatu. 2016. № 10-3. S. 12–15. EDN WWRPHL.

14. Guhman A.A. Vvedenie v teoriyu podobiya. 2-e izd. M.: Vysshaya shkola, 1973. 296 s.

15. Sedov L.I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike. 10-e izd. M.: Nauka, 1987. 432 s.

16. Sytdykov M.R., Ivanov A.V. Nauchnoe obosnovanie obobshchennogo kriteriya vybora sredstv pozharotusheniya // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2024. № 4 (72). S. 130–143. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2024-4-130-143

17. Podinovskij V.V., Nogin V.D. Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nyh zadach. M.: Fizmatlit, 2017. 256 s.

18. Matiev R.T. Metodika prinyatiya upravlencheskih reshenij po vyboru sposoba monitoringa prirodnyh pozharov v gornoj mestnosti // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2023. № 4. S. 169–184. DOI: 10.61260/2218-130X-2024-2023-4-169-184

19. Dalamagkidis K., Valavanis K.P., Piegl L.A. On integrating unmanned aircraft systems into the national airspace system: issues, challenges, operational restrictions, certification, and recommendations. Springer Science & Business Media, 2011. 218 p.

20. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. № 3. P. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

21. Utkin O V., Matveev A.V., Nefed'ev S.A. Sravnitel'nyj analiz metodov mnogokriterial'noj ocenki pri otbore kadrov v organizacionnyh sistemah // Problemy teorii i praktiki upravleniya. 2025. № 9. S. 107–123. EDN SWUSOM.

22. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. Nechetkie modeli i seti. 2-e izd., stereotip. M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2012. 284 s.

23. Zajchenko Yu.P. Nechetkie modeli i metody v intellektual'nyh sistemah. Kiev: izdatel'skij dom «Slovo», 2008. 344 s.

24. Mamdani E.H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // International Journal of Man-Machine Studies. 1975. Vol. 7. № 1. P. 1–13. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2

25. Ross T.J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. 3rd ed. Wiley, 2010. 585 p.

26. Şahin B., Yilmaz M. A Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Approach for Selection of Unmanned Aerial Vehicle // Journal of Aeronautics and Space Technologies. 2020. Vol. 13. № 1. P. 7–16.

27. Kumar A., Sharma R. Multi-criteria decision making for UAV selection using fuzzy logic approach // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. Vol. 8. № 9. P. 2278–3075.

28. Ruposov V.L. Metody opredeleniya kolichestva ekspertov // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2015. № 3 (98). S. 286–292.

29. Romashkina G.F., Tatarova G.G. Koefficient konkordacii v analize sociologicheskikh dannyh // Sociologiya: Metodologiya, metody, matematicheskie modeli. 2005. № 20. S. 131–158.

30. Orlov A.I. Organizacionno-ekonomicheskoe modelirovanie. M.: Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni N.E. Baumana, 2011. 486 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 20.01.2026; одобрена после рецензирования: 23.03.2026; принята к публикации: 26.03.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 20.01.2026; approved after review: 23.03.2026; accepted for publication: 26.03.2026

Информация об авторах:

Сытдыков Максим Равильевич, начальник кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: sytdykov@igps.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5343-4764>, SPIN-код: 7548-0539

Остапова Мария Викторовна, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: ria.sp@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0000-5391-7996>, SPIN-код: 6385-2337

Сильников Никита Михайлович, доцент кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: ria.sp@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0000-5391-7996>, SPIN-код: 6385-2337

Information about authors:

Sytdykov Maxim R., head of the department of fire, emergency rescue equipment and automotive industry 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: sytdykov@igps.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5343-4764>, SPIN: 7548-0539

Ostapova Maria V., adjunct of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: ria.sp@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0000-5391-7996>, SPIN: 6385-2337

Silnikov Nikita M., associate professor of the department of fire, emergency rescue equipment and automotive industry of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, SPIN: 9387-7550