

УДК 004, 614.8
МРНТИ 81.92.17

**А. Б. Кусайнов¹, Л. О. Агажаева², К. Ж. Раимбеков¹,
Р. М. Джумагалиев³, Н. Қ. Қайыргелді¹**

¹*Академия гражданской защиты имени Малика Габдуллина МЧС Республики
Казахстан, Кокшетау, Казахстан*

²*Служба государственной охраны Республики Казахстан, Астана, Казахстан*

³*ТОО «GFP Science», Алматы, Казахстан*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУШЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА С УЧЁТОМ ПОСТЕПЕННОГО ПРИБЫТИЯ СИЛ И СРЕДСТВ

Аннотация. В статье представлена динамическая математическая модель тушения лесного пожара с учётом: поэтапного прибытия сил и средств, распределения ресурсов по фронту, флангам и тылу, а также различной интенсивности распространения огня. Разработан алгоритм и показано, как определить оптимальное количество пожарных, автоцистерн и тракторов для локализации и полного тушения. Эффективная организация тушения лесных пожаров требует учета распределения периметра на участки различной опасности, а также своевременного прибытия сил и средств. Классические модели часто предполагают одномоментное прибытия ресурсов, что не отражает реальной оперативной обстановки. Настоящая работа предлагает динамическую модель с постепенным развертыванием сил и распределением ресурсов по фронту, флангам и тылу.

Ключевые слова: лесной пожар, динамическое моделирование, силы и средства.

Введение. Лесная экосистема является одной из важнейших компонентов биосферы, имеющий глобальное экологическое, социальное и экономическое значение для Республики Казахстан. Данное обстоятельство связано с тем, что территория Республики Казахстан составляет более 272500,0 тыс. га, из них на лесной фонд приходится всего 5 % [1].

Несмотря на то, что леса покрывают незначительную часть территории, они ежегодно подвергаются пожарам. Проведенный анализ показал, что в период с 2018 по 2025 гг. в Республике Казахстан произошло более 4,9 тыс. лесных пожаров (рисунок 1). Площадь, пройденная огнем, составила более 623,6 тыс. га [1].

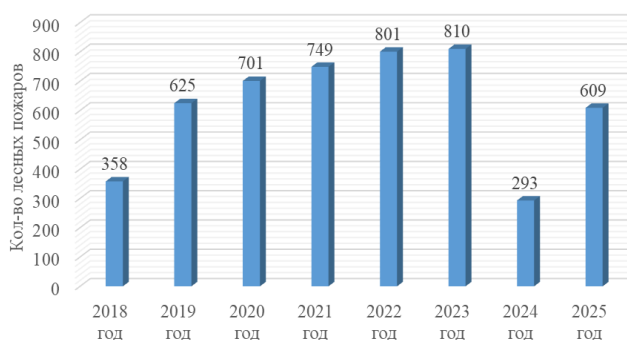


Рисунок 1 – Динамика лесных пожаров по годам

Анализ подверженности лесных экосистем предопределяет необходимость поиска оптимальных методов обеспечения пожарной безопасности, в том числе при управлении силами и средствами на пожаре [2].

Основная часть. При проведении работ по локализации природного пожара руководителю тушения лесного пожара (РТП) требуется из множества допустимых решений выбрать одно, наиболее рациональное решение по оптимальному распределению сил и средств для локализации пожара в кратчайшие сроки [3]. Количество возможных вариантов распределения сил и средств может быть достаточно большим, и выбрать наилучший из них, представляет затруднительную задачу [4].

Для поиска наиболее оптимального решения используются научно-обоснованные методы, в том числе математические. В целях применения подобных моделей процесс распределения сил и средств для тушения лесного пожара должен быть представлен в виде математической модели, т.е. математической задачи, которая количественно описывает основные закономерности процесса и его цель (критерий оптимизации). Задачи нахождения наилучшего решения называются оптимизационными. Очень часто цель оптимизации описывается в виде функции многих переменных, а допустимое множество решений задается системой функциональных равенств и/или неравенств [5].

Одним из методов принятия оптимального решения распределения сил и средств на пожаре является линейное программирование, позволяющее определять наибольшие или наименьшие значения искомой функции F при наличии ограничений [6, 7].

При распределении сил и средств на тушение лесного пожара, целевой функцией является минимизация ресурсов при их различной эффективности тушения за соответствующий интервал времени [5]:

$$F = x + y + z + t \rightarrow \min \quad (1)$$

где z – трактора (ед.), y – пожарные автоцистерны (ед.), x – личный состав (чел.), t – время (мин.).

В целях автоматизации процесса принятия управленческого решения РТП по оптимальному распределению сил и средств при локализации лесного пожара с учетом скорости распространения огня по фронту, флангам и тылу, разработан соответствующий алгоритм (рисунок 2).

Представленный алгоритм реализуется в несколько этапов.

На первоначальном этапе, вводятся данные - скорость ветра $v_{\text{вет}}$, м/с, влажность воздуха, крутизна склона, время свободного развития пожара t , мин., время прибытия сил и средств Δt , мин., коэффициенты распределения сил и средств по фронту, флангам и тылу пожара $\beta_f, \beta_{fl}, \beta_t$.

После ввода соответствующих значений рассчитываются скорость распространения огня по фронту (v_1), флангам (v_2) и тылу (v_3) пожара [4]:

$$v_1 = v_{\text{вет}} \cdot K_W \cdot K_Q \quad (2)$$

$$v_2 = 0,35 \cdot v_1 + 0,17 \quad (3)$$

$$v_3 = 0,10 \cdot v_1 + 0,20 \quad (4)$$

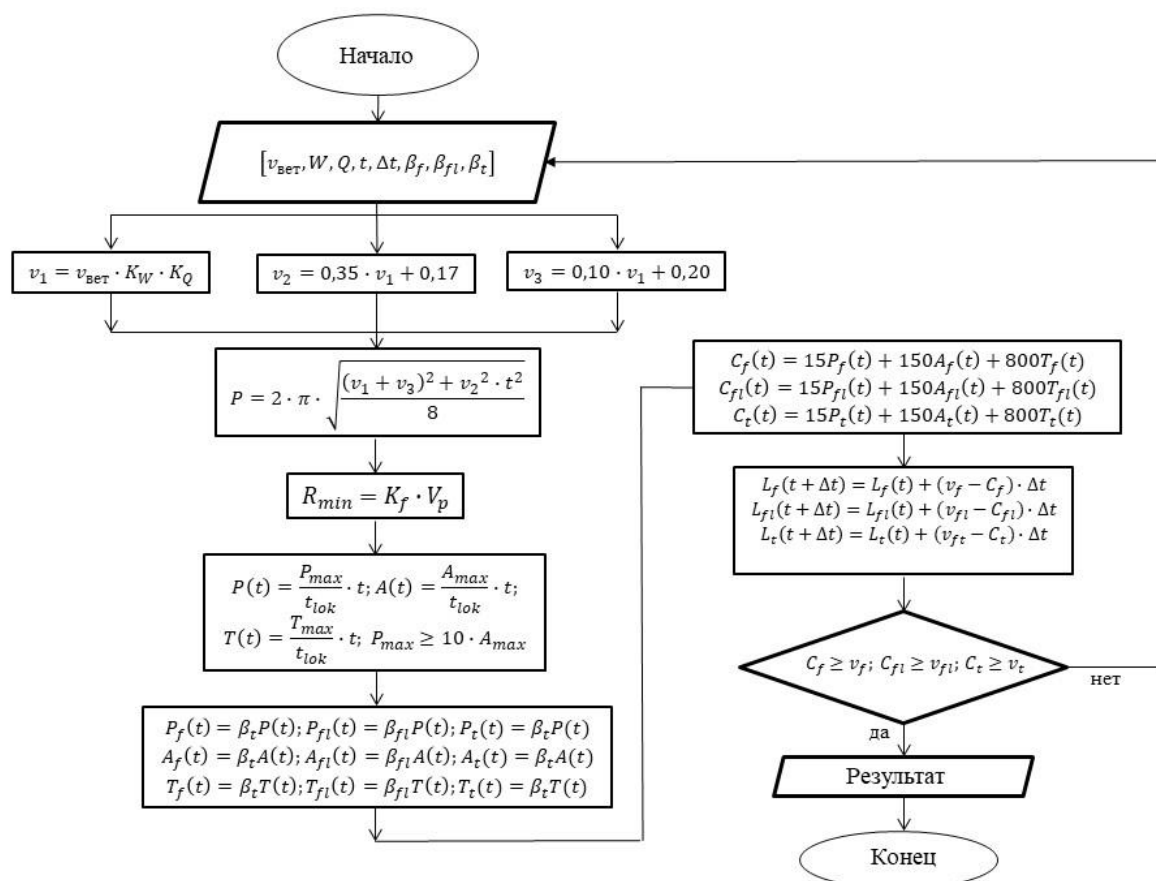


Рисунок 2 - Алгоритм оптимального распределения сил и средств на тушение лесного пожара

По полученным значениям скорости распространения огня v_1 - v_3 прогнозируется периметр кромки пожара на заданный интервал времени [4]:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{(v_1 + v_3)^2 + v_2^2 \cdot t^2}{8}} \quad (5)$$

Затем определяется увеличение периметра пожара:

$$R_{min} = K_f \cdot V_p, \text{ м/час} \quad (6)$$

где V_p – скорость ежечасного прироста пожара, K_f – коэффициент тактического снижения прироста при атаке на фронт равный 0,7.

Далее проводится расчет постепенного прибытия сил и средств:

$$P(t) = \frac{P_{max}}{t_{lok}} \cdot t; A(t) = \frac{A_{max}}{t_{lok}} \cdot t; T(t) = \frac{T_{max}}{t_{lok}} \cdot t; P_{max} \geq 10 \cdot A_{max} \quad (7)$$

С учетом коэффициентов проводится расчет распределения $P(t)$ – пожарных, $A(t)$ – автоцистерн, $T(t)$ – тракторов по фронту, флангам и тылу пожара:

$$P_f(t) = \beta_t P(t); P_{fi}(t) = \beta_{fi} P(t); P_t(t) = \beta_t P(t) \quad (8)$$

$$A_f(t) = \beta_t A(t); A_{fl}(t) = \beta_{fl} A(t); A_t(t) = \beta_t A(t) \quad (9)$$

$$T_f(t) = \beta_t T(t); T_{fl}(t) = \beta_{fl} T(t); T_t(t) = \beta_t T(t) \quad (10)$$

Оптимизация сил и средств осуществляется с помощью обобщенного градиентного метода, предназначенного для нелинейных задач, так как целевая функция зависит от переменных не линейно.

Производительность выполнения работ в течении одного часа составляет для пожарного - 15 м/ч, пожарной автоцистерны - 150 м/ч, трактора - 800 м/ч. [4]. Тогда интенсивность тушения лесного пожара по фронту, флангам и тылу имеет вид:

$$C_f(t) = 15P_f(t) + 150A_f(t) + 800T_f(t) \quad (11)$$

$$C_{fl}(t) = 15P_{fl}(t) + 150A_{fl}(t) + 800T_{fl}(t) \quad (12)$$

$$C_t(t) = 15P_t(t) + 150A_t(t) + 800T_t(t) \quad (13)$$

Затем проводится расчет увеличения периметра пожара P , м/час. Общий периметр пожара $L(t)$ разделяется на три зоны с применением нелинейного программирования [8]:

$$L(t) = L_f(t) + L_{fl}(t) + L_t(t) \quad (14)$$

где $L_f(t)$ – фронт, $L_{fl}(t)$ – фланги, $L_t(t)$ – тыл пожара.

Прирост периметра различен:

$$v_f = a_f \bar{v}, v_{fl} = a_{fl} \bar{v}, v_t = a_t \bar{v} \quad (15)$$

где $a_f + a_{fl} + a_t = 1$

Для численных расчетов принято: $a_f = 0,45$; $a_{fl} = 0,35$; $a_t = 0,2$.

Система дифференциальных уравнений описывает динамику периметра [9]:

$$\frac{dL_f}{dt} = v_f - C_f(t); \frac{dL_{fl}}{dt} = v_{fl} - C_{fl}(t); \frac{dL_t}{dt} = v_t - C_t(t) \quad (16)$$

Динамика увеличения периметра (дискретный шаг) пожара по фронту, флангам и тылу имеет вид [8]:

$$L_f(t + \Delta t) = L_f(t) + (v_f - C_f) \cdot \Delta t \quad (17)$$

$$L_{fl}(t + \Delta t) = L_{fl}(t) + (v_{fl} - C_{fl}) \cdot \Delta t \quad (18)$$

$$L_t(t + \Delta t) = L_t(t) + (v_t - C_t) \cdot \Delta t \quad (19)$$

Локализация лесного пожара достигается при следующих условиях:

$$C_f \geq v_f; C_{fl} \geq v_{fl}; C_t \geq v_t \quad (20)$$

В завершении РТП получает данные по оптимальному распределению сил и средств по фронту, флангам и тылу для локализации очага пожара, с учетом прогнозных значений распространения лесного пожара.

Рассмотрим пример оптимального распределения сил и средств для тушения лесного пожара с учетом периметра распространения.

Для моделирования примем следующие условия: скорость ветра 10 м/с, влажность воздуха 20 %, крутизна склона 15°, время свободного развития составляет $t = 60$ мин, время прибытия сил и средств $\Delta t = 10$ мин. (0,1667 часа), $\beta_f = 0,5$; $\beta_{fl} = 0,35$; $\beta_t = 0,15$.

Проведенные расчеты показали, что скорость фронта $v_1 = 57$ м/мин, скорость фланга $v_2 = 20,12$ м/мин и скорость тыла $v_3 = 5,9$ м/мин.

В условиях сильного ветра контур пожара принимает форму вытянутого эллипса. Тогда периметр пожара будет равен $P = 8802$ м. Ежечасный прирост пожара составит $R_{min} = 6161$ м/час.

Результаты математического моделирования оптимального распределения сил и средств с учетом параметров развития пожара представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты математического моделирования оптимального распределения сил и средств с учетом параметров развития пожара

t, мин.	0	10	20	30	40	50
P(t)	0	96	192	287	287	287
A(t)	0	9	19	28	28	28
T(t)	0	6	13	20	20	20
P _f (t)	0	48	96	144	144	144
P _{fl} (t)	0	34	67	100	100	100
P _t (t)	0	14	29	43	43	43
A _f (t)	0	5	9	14	14	14
A _{fl} (t)	0	3	7	10	10	10
A _t (t)	0	1	3	4	4	4
T _f (t)	0	3	7	10	10	10
T _{fl} (t)	0	2	4	7	7	7
T _t (t)	0	1	2	3	3	3
L _f (t)	3961	3738	2831	1239	-351	-1943
L _{fl} (t)	3081	2961	2362	1284	206	-872
L _t (t)	1760	1760	-293	-4401	-8507	-12614

Из таблицы 1 видно, что по $L_f(t)$, $L_{fl}(t)$ и $L_t(t)$ отрицательные значения достигаются при $t=50$ мин, то есть локализация пожара происходит через 0,833 ч. (50 мин.) после начала тушения пожара. При этом для локализации лесного пожара требуется следующее количество сил и средств:

- пожарных $P(t) = 287$, из них 144 на фронт пожара, 100 на фланги и 43 на тыл;
- пожарные автоцистерны $A(t) = 28$, из них 14 на фронт пожара, 10 на фланги и 4 на тыл;
- тракторов $T(t) = 20$, из них 10 на фронт пожара, 7 на фланги и 3 на тыл.

Выводы. Разработанный алгоритм оптимального распределения сил и средств позволяет в динамике учитывать постепенное прибытие сил и средств, а также интенсивность распространения огня по фронту, флангам и тылу. На основании чего проводится оптимальное распределение ресурсов по фронту, флангам и тылу для эффективной локализации и полного тушения лесного пожара с наименьшими социальными, экономическими и экологическими последствиями.

Алгоритм позволяет автоматизировать процесс принятия решения РТП, планирования, оценки времени локализации и количества сил и средств, требуемых для локализации и ликвидации лесного пожара.

Список литературы

1. Официальный сайт Комитета лесного хозяйства и животного мира Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gov.kz/memleket/entities/forest?lang=ru> (дата обращения: 28.12.2025 г.).
2. Лесные пожары и борьба с ними [Текст] : сборник научных трудов / Ленинградский НИИ лесн. хоз-ва; [ред.кол.: Е. С. Арцыбашев (отв. ред.) и др.]. – Ленинград : ЛенНИИЛХ, 1986. – 152 с.
3. Приказ Министра сельского хозяйства Республики Казахстан. Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах: утв. 23.10.2015 г. №18-02/942 [Электронный ресурс] // Информационный портал ПАРАГРАФ [сайт]. Режим доступа: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500012351> (дата обращения: 08.11.20253).
4. Кусаинов А.Б. Управление лесопожарным риском: монография – Кокшетау: Академия гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС РК, 2024. – 138 с.
5. Шикин Е.В., Чхартишвили А.Г. Математические методы и модели. – М.: «КДУ», 2009. – 440 с.
6. Садовничий Ю.В. ЕГЭ. Математика. Решение задач и уравнений в целых числах. – М.: «Экзамен», 2015. – 126 с.
7. Юдин, Д.Б. Линейное программирование. Теория, методы и приложения / Д.Б. Юдин, Е.Г. Гольштейн. – М.: Красанд, 2012. – 428 с.
8. Решение задач линейного программирования в Microsoft Excel. – Методические указания. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023.

References

1. Oficial'nyj sajt Komiteta lesnogo hozjajstva i zhivotnogo mira Ministerstva jekologii i prirodnyh resursov Respubliki Kazahstan [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.gov.kz/memleket/entities/forest?lang=ru> (data obrashhenija: 28.12.2025 g.).
2. Lesnye pozhary i bor'ba s nimi [Tekst] : sbornik nauchnih trudov / Leningradskij NII lesn. hoz-va; [red.kol.: E. S. Arcybashev (otv. red.) i dr.]. – Leningrad : LenNIILH, 1986. – 152 s.
3. Prikaz Ministra sel'skogo hozjajstva Respubliki Kazahstan «Ob utverzhdenii Pravil pozharnoj bezopasnosti v lesah» ot 23.10.2015g. №18-02/942 [Jelektronnyj resurs] // Informacionnyj portal PARAGRAF [sajt]. Rezhim dostupa: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500012351> (data obrashhenija 08.11.20253).
4. Kusainov A.B. Upravlenie lesopozharnym riskom: monografija – Kokshetau: Akademija grazhdanskoj zashhity im. M. Gabdullina MChS RK, 2024. – 138 s.
5. Shikin E.V., Chhartishvili A. G. Matematicheskie metody i modeli. – M.: «KDU», 2009. – 440 s.
6. Sadovnichij Ju.V. EGJe. Matematika. Reshenie zadach i uravnenij v celyh chislah. – M.: «Jekzamen», 2015. – 126 s.
7. Judin, D.B. Linejnoe programmirovanie. Teorija, metody i prilozhenija / D.B. Judin, E.G. Gol'shtejn. – M.: Krasand, 2012. – 428 s.
8. Reshenie zadach linejnogo programmirovaniya v Microsoft Excel. – Metodicheskie ukazaniya. – M.: MGTU im. N. Je. Baumana, 2023.

А. Б. Құсайынов¹, Л. О. Агажаева², К. Ж. Раимбеков¹, Р. М. Джумағалиев³, Н. Қ. Қайыргелді¹

¹Қазақстан Республикасы ТЖМ Мәлік Ғабдуллин атындағы Азаматтық қорғау академиясы,
Көкшетау, Қазақстан

²Қазақстан Республикасының Мемлекеттік күзет қызметі, Астана, Қазақстан

³ЖШС «GFP Science», Алматы, Қазақстан

КҮШТЕР МЕН ҚҰРАЛДАРДЫҢ БІРТІНДЕП КЕЛУІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, ОРМАН ӨРТІН СӨНДІРУДІ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа. Мақалада орман өртін сөндірудің динамикалық математикалық моделі келтірілген: күштер мен құралдардың кезең-кезеңімен келуі, ресурстарды майданға, қапталға және тылға бөлу, сондай-ақ өрттің таралуының әртүрлі қарқындылығы. Алгоритм әзірленді және оқшаулау және толық сөндіру үшін өрт сөндірушілердің, автоцистерналар мен тракторлардың оңтайлы санын қалай анықтау керектігі көрсетілген. Орман өрттерін сөндіруді тиімді ұйымдастыру периметрдің әртүрлі қауіпті жерлерге бөлінуін, сондай-ақ күштер мен құралдардың уақтылы келуін ескеруді талап етеді. Классикалық модельдер көбінесе нақты операциялық жағдайды көрсетпейтін ресурстардың бір уақытта келуін болжайды. Бұл жұмыс күштерді біртіндеп орналастырумен және ресурстарды майданға, қапталға және тылға бөлумен динамикалық модельді ұсынады.

Түйінді сөздер: дала өрті, динамикалық модельдеу, күштер мен құралдар.

A. B. Kusainov¹, L. O. Agazhaeva², K. Zh. Raimbekov¹, R. M. Dzhumagaliev³, N. K. Kairgeldi¹

¹Civil Defence Academy named after Malik Gabdullin MES of the Republik of Kazakhstan,
Kokshetau, Kazakhstan

²State Security Service of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan

³«GFP Science» LLP, Almaty, Kazakhstan

MATHEMATICAL MODELING OF FOREST FIRE EXTINGUISHING, TAKING INTO ACCOUNT THE GRADUAL ARRIVAL OF FORCES AND MEANS

Abstract. The article presents a dynamic mathematical model of forest fire extinguishing, taking into account: the phased arrival of forces and means, the distribution of resources along the front, flanks and rear, and the varying intensity of fire spread. There has been developed an algorithm and it is shown how to determine the optimal number of firefighters, tank trucks and tractors for localization and complete extinguishing. Effective organization of forest fire extinguishing requires consideration of the distribution of the perimeter to areas of varying danger, as well as the timely arrival of forces and means. Classical models often assume a simultaneous flow of resources, which does not reflect the actual operational situation. This paper proposes a dynamic model with a gradual deployment of forces and the distribution of resources along the front, flanks and rear.

Keywords: forest fire, dynamic modeling, forces and means.

Сведения об авторах / Information about the authors

Кусаинов Арман Булатович – кандидат технических наук, ассоциированный профессор (доцент), начальник факультета дистанционного обучения Академии гражданской защиты имени Малика Габдуллина МЧС Республики Казахстан, Кокшетау, Казахстан. E-mail: arman_1703@mail.ru

Агажасева Лилия Онерхановна – кандидат психологических наук, Служба государственной охраны Республики Казахстан, Астана, Казахстан

Раимбеков Кендебай Жанабилевич – кандидат физико-математических наук, ассоциированный профессор (доцент), Академия гражданской защиты имени Малика Габдуллина МЧС Республики Казахстан, Кокшетау, Казахстан. E-mail: kendeбай_63@mail.ru

Джумагалиев Руслан Маркленович – кандидат технических наук, профессор, ТОО "GFP Science", Алматы, Казахстан. E-mail: ruslan_djum@mail.ru, r_djum@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0724-9218>

Каиргельды Нурислам Куанышевич – старший преподаватель-методист факультета дистанционного обучения Академии гражданской защиты имени Малика Габдуллина МЧС Республики Казахстан, Кокшетау, Казахстан. E-mail: nurislam.kayyrgeldin@bk.ru

Arman B. Kussainov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Faculty of Distance Learning of the Malik Gabdullin Academy of Civil Protection of the MES of the Republic of Kazakhstan, Kokshetau, Kazakhstan. E-mail: arman_1703@mail.ru

Lilia O. Agazhayeva – Candidate of Psychological Sciences, State Security Service of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan

Kendebay Zh. Raimbekov – candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Malik Gabdullin Academy of Civil Protection of the MES of the Republic of Kazakhstan. Kokshetau, Kazakhstan. E-mail: kendeбай_63@mail.ru

Ruslan M. Dzhumagaliev – Candidate of Technical Sciences, Professor, "GFP Science" LLP, Almaty, Kazakhstan. E-mail: ruslan_djum@mail.ru, r_djum@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0724-9218>

Nurislam K. Kaiyrgeldy - Senior lecturer and methodologist at the Faculty of Distance Learning at the Malik Gabdullin Academy of Civil Protection of the MES of the Republic of Kazakhstan, Kokshetau, Kazakhstan. E-mail: nurislam.kayyrgeldin@bk.ru