

УДК 614.838.44:536.3

doi: 10.37657/vniipo.avpb.2022.19.29.001

О ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭВАКУАЦИОННЫХ ВЫХОДОВ В ЗДАНИЯХ КОРИДОРНОГО КУСОЧНО-ПРЯМОУГОЛЬНОГО ТИПА

Валерий Геннадьевич Шамонин, Станислав Анатольевич Зуев, Петр Алексеевич Леончук, Светлана Юрьевна Хатунцева

Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

Аннотация. При проектировании зданий коридорного типа возникает вопрос об оптимальном размещении эвакуационных выходов вдоль одной или обеих сторон длинного коридора. В предыдущей статье [1] был рассмотрен вопрос о равномерном распределении выходов, как для широких, так и для узких коридоров, и был представлен соответствующий критерий. Настоящая статья является продолжением работы [1]. Рассматривается оптимальное устройство ЭВ по обеим сторонам коридора кусочно-прямоугольного типа в жилых и административных зданиях (буквы П) в случае, если такое устройство не предусмотрено в проекте. Требование максимальной удаленности ЭВ друг от друга минимизирует смешение людских потоков при пожаре. Сформулирована неклассическая задача максимина (maxmin), для решения которой предложен численный метод прямого поиска – МЛВ. По разработанной программе на языке ТурбоПаскаль-7 проведены расчеты.

Ключевые слова: эвакуационный выход, ширина эвакуационных выходов, координаты центров эвакуационных выходов, число эвакуационных выходов, метод локальных вариаций

Для цитирования: Шамонин В.Г., Зуев С.А., Леончук П.А., Хатунцева С.Ю. О проектировании эвакуационных выходов в зданиях коридорного кусочно-прямоугольного типа // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2022. № 4 (14). С. 6–12. <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2022.19.29.001>.

ON DESIGN OF EVACUATION EXITS IN CORRIDOR BUILDINGS OF PIECEWISE RECTANGULAR TYPE

Valeriy G. Shamonin, Stanislav A. Zuev, Petr A. Leonchuk, Svetlana Yu. Khatuntseva

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.

Abstract. When designing corridor-type buildings there is a question about the optimal placement of evacuation exits along one or both sides of a long corridor. The previous paper [1] considered the issue of uniform distribution of exits for both wide and narrow corridors, and there was presented the corresponding criterion. The present paper is a continuation of the work [1]. It considers the optimal arrangement of EEs on both sides of a piecewise rectangular corridor in residential and office buildings (letters P) if such device is not provided in the project. In this case, the requirement of

maximum distance of EEs from each other minimizes the mixing of human flows during a fire. The nonclassical Maximin problem (maxmin) is formulated, for the solution of which there is proposed a numerical method of direct search – MLV. Calculations were carried out according to the developed program in the TurboPascal-7 language.

Keywords: evacuation exit, evacuation exit width, coordinates of evacuation exit centres, number of evacuation exits, method of local variations

For citation: Shamonin V.G., Zuev S.A., Leonchuk P.A., Khatuntseva S.Yu. On design of evacuation exits in corridor buildings of piecewise rectangular type. Aktual'nye Voprosy Pozharnoi Bezopasnosti – Current Fire Safety Issues, 2022, no. 4, pp. 6-12. (In Russ.). <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2022.19.29.001>.

Введение

Данная статья является продолжением работы [1], где рассмотрено оптимальное проектирование ЭВ в коридорах простейшего прямоугольного типа (рис. 1 в [1]). Там же сформулированы постановка неклассической задачи максимина (maxmin) для указанных коридоров, представлен критерий разделения коридоров на «узкие» и «широкие» (для последнего типа указано элементарное решение), на основе численного алгоритма локальных вариаций (МЛВ [2]) разработана программа численной реализации на языке ТурбоПаскаль-7 и проведена серия расчетов.

В данной работе рассматривается вопрос о расположении эвакуационных выходов (ЭВ) по обеим сторонам кусочно-прямоугольного коридора (вида буквы П, рис. 1), в торцах которого имеется хотя бы один ЭВ, ведущий на лестничную клетку или в безопасную зону.

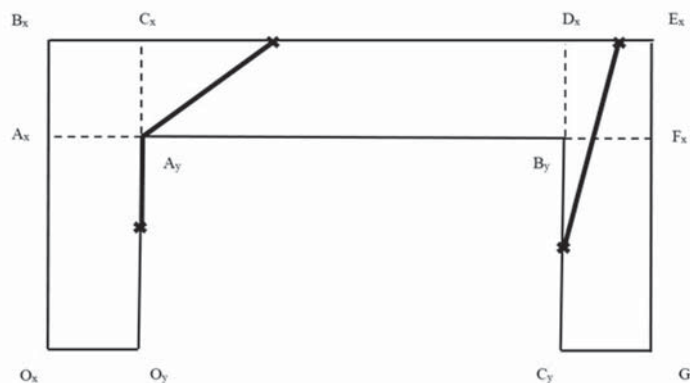


Рис. 1. План коридора (П – конфигурация, $N_x = 7$, $N_y = 4$).

Типы расстояний между эвакуационными выходами на разных сторонах коридора

Также как и в статье [1] при отсутствии конкретных проектных решений по расположению ЭВ, обусловленных конфигурацией этажа, предлагается решение по максимальной удаленности ЭВ друг от друга, минимизирующее смешение людских потоков (и, соответственно, панику) при эвакуации в случае пожара или других чрезвычайных ситуаций.

Постановка задачи

Рассматривается вопрос об оптимальном расположении ЭВ на «верхней» (в плане, рис. 1) и «нижней» сторонах «узкого» коридора длинами L_x и L_y соответственно и шириной b . В проектном решении заданы величины L_x , L_y , a , b , N_x , N_y (числа ЭВ на верхней и нижней сторонах коридора соответственно), а также их ширины dx_1 , dx_2 , dx_{N_x} , dy_1 , dy_{N_y} (хотя, чаще всего, они одинаковы). Из двух главных выходов (на лестничную клетку или в безопасную зону) предусмотрен хотя

бы один, пусть это будет ЭВ_L, второй ЭВ_R может отсутствовать или быть аварийным на наружную лестницу.

На рис. 1 представлены все геометрические размеры рассматриваемого коридора:

$$\begin{aligned} O_x A_x &= O_y A_y = B_y C_y = F_x G_x = Ly_{23}; A_x B_x = A_y C_y = B_y D_y = F_x E_x = b; \\ O_x O_y &= A_x A_y = B_x C_x = C_x G_x = B_y F_y = D_y E_y = a; \\ O_x B_x &= O_y C_y = C_x D_x = G_x E_x = Lx_{23}; A_x B_x = C_x D_x = L_1. \end{aligned}$$

Другие геометрические параметры (рис. 1) связаны с вышеуказанными соотношениями:

$$Lx_{23} = (Lx - L_1)/2 - a, Ly_{23} = Lx_{23} - b, Ly = L_1 + 2Ly_{23}. \quad (1)$$

Далее, в проектном решении может быть предусмотрено расположение ЭВ, исходя из конфигурации этажа (наличие проходов между стеллажами в хранилище или в торговом зале). В противном (рассматриваемом нами случае), как отмечено во введении, целесообразно максимально удалить ЭВ друг от друга. Введем обозначения (рис. 1, 2):

x_1 – расстояние от центра 1-го ЭВ до левого торца коридора;

x_{Nx+1} – расстояние от центра Nx-го ЭВ до правого торца коридора;

Ox – начало отсчета координат вдоль верхней стороны коридора и аналогично Oy – вдоль нижней стороны;

x_i – расстояние между центрами $i-1$ и i ЭВ.

И аналогично для ЭВ нижней стороны с заменой $x \rightarrow y$.

Координаты центров ЭВ верхней стороны коридора (начало – в левом углу, точка Ox , рис. 1, 2):

$$Rx_1 = x_1, Rx_{Nx} = L - x_{Nx+1}, Rx_i = Rx_{i-1} + x_i; i = \overline{2, Nx} \quad (L - \text{см. ниже}). \quad (2)$$

А также для ЭВ нижней стороны с заменой $x \rightarrow y$.

Отметим, что рассматриваемая проблема является частью общей, а именно, проектированием конфигурации этажа: найти оптимальные значения $L, b, Nx, Ny, dx_i, x_i, dy_j, y_j, i = \overline{1, Nx}; j = \overline{1, Ny}$.

Далее будем рассматривать только случай «узких» коридоров ($b \geq b^*$) [1]) при оптимальном размещении ЭВ на обеих сторонах следует учитывать «влияние» верхних и нижних ЭВ друг на друга т. е. расстояние между ними.

Математическая модель задачи

Для ЭВ на верхней стороне коридора имеем очевидные ограничения:

$$\begin{aligned} x_1 \geq dx_1/2, x_2 \geq (dx_1 + dx_2)/2, \dots, x_{Nx} \geq (dx_{Nx-1} + dx_{Nx})/2, x_{Nx+1} \geq dx_{Nx}/2, \\ x_1 + x_2 + \dots + x_{Nx+1} = L_x, \end{aligned} \quad (3)$$

а для ЭВ на нижней – аналогичные с заменой $x \rightarrow y$.

Для приведения (2) и (3) к удобному безразмерному виду отнесем все размерные величины к величине $L = \max(Lx, Ly)$ (обозначив безразмерные величины черточкой сверху): $\bar{b} = b/L; \bar{x}_i = x_i/L_x, i = \overline{1, Nx}, \bar{a} = a/L, \bar{y}_j = y_j/L_y, j = \overline{1, Ny}, \bar{Lx} = Lx/L, \bar{Ly} = Ly/L, \bar{Lx}_{23} = Lx_{23}/L; \bar{Ly}_{23}/L, L_1 = L_1/L$.

Обозначим $dx_{\max} = \max(dx_i), \bar{dx}_i = dx_i/dx_{\max}; i = \overline{1, Nx}, kx = 0,5 * dx_{\max}/L_x$, и аналогично для нижней стороны $dy_{\max} = \max(dy_j), \bar{dy}_j = dy_j/dy_{\max}, ky = 0,5 * dy_{\max}/L_y$.

В безразмерном виде ограничения (3) принимают вид:

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 \geq kx * \bar{dx}_1, \bar{x}_2 \geq kx * (\bar{dx}_1 + \bar{dx}_2), \dots, \bar{x}_{Nx} \geq kx * (\bar{dx}_{Nx-1} + \bar{dx}_{Nx}), \bar{x}_{Nx+1} \geq kx * \bar{dx}_{Nx}, \\ \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_{Nx+1} = 1. \end{aligned} \quad (4)$$

Аналогичные ограничения для переменных для нижней стороны коридора с заменой $x \rightarrow y$.

В дальнейшем черточки и волны над безразмерными величинами опущены для простоты. Это также касается координат центров ЭВ сторон коридора (2), $\overline{Rx}_i = Rx_i/L, \overline{Ry}_j = Ry_j/L, i = \overline{1, Nx}, j = \overline{1, Ny}$. (5)

Введем обозначения:

$$Mx = [Lx - kx*(dx_1 + dx_{Nx})]/(Nx - 1), i = \overline{2, Nx - 1}. \quad (6)$$

Аналогичное соотношение имеет место для нижнего ряда ЭВ с заменой $x \rightarrow y$:

$$My = [1 - ky*(dy_1 + dy_{Ny})]/(Ny - 1), j = \overline{2, Ny - 1}, \quad (7)$$

Вышеупомянутая критическая ширина коридора, очевидно, определяется соотношением: $b^* = \max(Mx, My)$. (8)

Обозначим расстояние между i -м верхним и j -м нижним ЭВ $Rxy_{ij}, i = \overline{1, Nx}; j = \overline{1, Ny}$.

Для «простого» прямолинейного коридора ([1]) очевидно $Rxy_{ij} = [(Rx_i - Ry_j)^2 + b^2]^{1/2}$, в нашем случае П-образного коридора эти формулы сложнее, будут представлены ниже.

Формулировка задачи:

Найти $MxyR = \max(x_1, x_{Nx+1}, y_1, y_{Ny+1}, F(x_2 \dots x_{Nx}, y_2 \dots y_{Ny}, Rxy_{ij})), i = \overline{1, Nx}, j = \overline{1, Ny}$ (9) при ограничениях (4) и аналогичных для ЭВ нижнего ряда; координаты Rx и Ry определяются соотношениями (5), здесь обозначено

$$F(x_2, x_{Nx}, y_2, \dots, y_{Ny}, Rxy_{ij}) = \min(x_2, x_{Nx}, y_2, y_{Ny}, Rxy_{ij}). \quad (10)$$

Переменные в правой части (9) можно условно отнести к двум типам: «пассивно-активным» и «активным». А именно:

x_{Nx+1} и y_{Ny+1} – 1-го типа: варьируются, не «участвуют» в минимизации (10), но должны удовлетворять ограничениям (4), т. е. корректируются по условию нормировки (4);

x_1 и y_1 – 1-го типа: они варьируются, должны удовлетворять ограничениям (4), но не фигурируют в процедуре минимизации (10);

«диагональные» расстояния Rxy_{ij} – 1-го типа: они вычисляются по нижеследующим формулам, т. е. не варьируются и не связаны с ограничениями, но фигурируют в процедуре минимизации (10);

$x_2 \dots x_{Nx}, y_2 \dots y_{Ny}$ – 2-го типа: они варьируются, должны удовлетворять ограничениям (4) и фигурируют в процедуре минимизации (10).

Формулы для «диагональных» расстояний (рис. 1).

ЭВ на верхней стороне коридора может находиться на отрезках

$O_x A_x, A_x B_x, B_x C_x, C_x D_x, D_x E_x, E_x F_x, F_x G_x$ – всего 7 позиций. ЭВ на нижней стороне – на $O_y A_y, A_y B_y, B_y C_y$ – 3 позиции соответственно. Всего имеем $7 \times 3 = 21$ комбинации «диагональных» расстояний.

Простые геометрические рассуждения показывают, что эти расстояния (кратчайшие в пределах коридора, т. е. не выходя за его границы) делятся на два типа: только диагонали и диагонали плюс отрезки координатных осей (число первых – 11). Это разделение обусловлено тем, что наш коридор не является выпуклой областью.

Рис. 1 иллюстрирует оба типа, для первого имеем:

$$Lx_{23} + a + L_1 < Rx < Lx - Lx_{23}; Ly_{23} + L_1 < Ry < Ly,$$

$$Rxy = [(Rx - Lx_{23} - a - L_1)^2 + (b + Ry - Ly_{23} - L_1)^2]^{1/2}.$$

$$\text{Второй тип: } Lx_{23} + a < Rx < Lx_{23} + a + L_1; Ry < Ly_{23},$$

$$Rxy = [(Rx - Lx_{23} - a)^2 + b^2]^{1/2} + Ly_{23} - Ry.$$

Формулы для оставшихся 19 вариантов аналогичны этим и не приводятся.

Тестовые примеры и проверочные расчеты

В проведенных расчетах начальная конфигурация ЭВ была принята равномерной, включая крайние ЭВ: $x_0(i) = 1,0/(Nx + 1)$; $y_0(j) = 1,0/(Ny + 1)$; $i = \overline{1, Nx + 1}$; $j = \overline{1, Ny + 1}$.

1. Здесь конфигурация П-коридора была принята «изгибом» исходной в [1] и «укорочением» нижней стороны (в плане). $Nx = 4$; $Ny = 7$.

Геометрические параметры коридора (размерные) следующие (рис. 1):

$Lx = O_x D_x E_x F_x G_x = 30,25$ м; $a = O_x O_y = b = A_x B_x = 2,4$ м; $L_1 = A_y B_y = 18,0$ м.

Ширины ЭВ: $dy_1 = dy_2 = dy_3 = 0,7$ м; $dy_4 = 1,0$ м, $dx_i = 0,9$ м, $i = \overline{1, Nx}$.

Предполагаемая конфигурация ЭВ (верхний индекс real):

$y_1^{(real)} = 1,58$; $y_2^{(real)} = 6,0$; $y_3^{(real)} = 5,95$; $y_4^{(real)} = 5,45$; $y_5^{(real)} = 1,675$ м;

$x_1^{(real)} = 2,71$; $x_2^{(real)} = 4,9$; $x_3^{(real)} = 4,5$; $x_4^{(real)} = 5,3$; $x_5^{(real)} = 3,45$; $x_6^{(real)} = 3,9$; $x_7^{(real)} = 3,4$;

$x_8^{(real)} = 2,09$ м.

В результате расчета после 50 внешних итераций оказалось, что оба крайних ЭВ «прижаты» к торцам: $y_1^{(50)} = y_8^{(50)} = 0,014876$. Оказалось, что оптимально близкие к 1 отношения $\mu_x = x^{(real)}/(L \cdot x^{(50)})$ и, соответственно, $\mu_y = y^{(real)}/(L \cdot y^{(50)})$ составили $\mu_{x,3} = 0,9766$ и $\mu_{x,4} = 0,9618$. Искомая величина $M_{xyR} = 0,120792$ реализована на «диагонали» R_{23} . Для существующего расположения ЭВ (real) эта величина $M_{xyR} = 0,080545$, т. е. меньше на 50 %.

Наконец отметим, что упомянутых 50 итераций было достаточно для достижения малости величины $\delta = (\|\vec{x}^{(k+1)} - \vec{x}^{(k)}\|^2 + \|\vec{y}^{(k+1)} - \vec{y}^{(k)}\|^2)^{1/2}$, т. е. норм векторов на двух соседних итерациях. Было получено $\delta = 4,56 \cdot 10^{-13}$.

2. В качестве другого примера приведем конфигурацию эвакуационного коридора в магазине в цокольном этаже жилого дома по ул. Б. Хмельницкого г. Иваново (рис. 2 и рис. 3 – из Интернета).

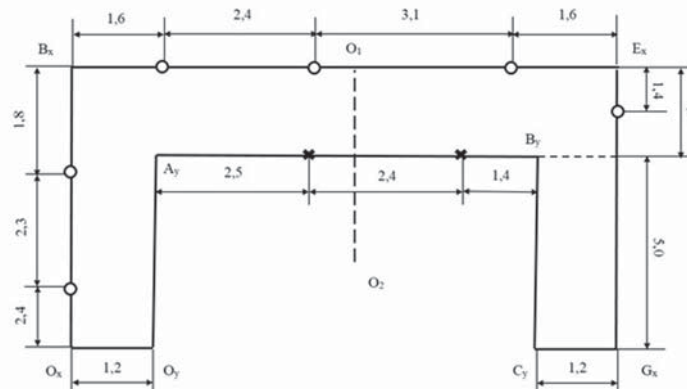


Рис. 2. Конфигурация эвакуационного коридора в магазине в цокольном этаже жилого дома по ул. Б. Хмельницкого г. Иваново

Здесь $Nx = 6$; $Ny = 2$. Конфигурация коридора в магазине (рис. 1 и 2):

$Lx = 21,7$ м; $a = 1,2$ м, $b = 1,5$ м; $L_1 = 6,3$ м; $Lx_{23} = 6,5$ м; $Ly_{23} = 5,0$ м;

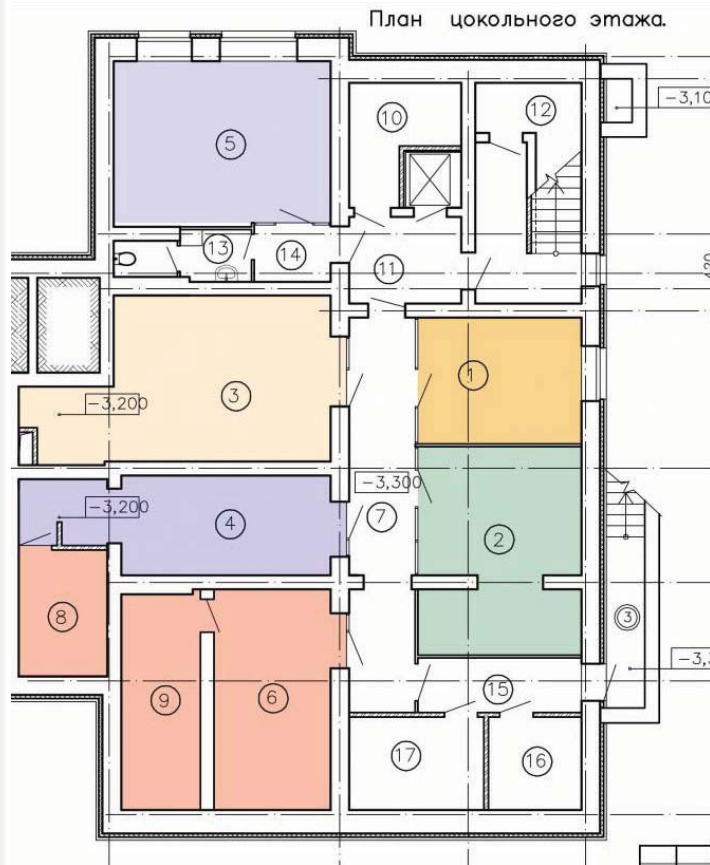
Существующая конфигурация ЭВ (верхний индекс real):

$x_1^{(real)} = 2,4$; $x_2^{(real)} = 2,3$; $x_3^{(real)} = 1,8 + 1,6 = 3,4$; $x_4^{(real)} = 2,4$; $x_5^{(real)} = 3,1$ м; $x_6^{(real)} = 1,6 + 1,4 = 3,0$ м; $x_7^{(real)} = 6,5 - 1,4 = 5,1$ м;

$y_1^{(real)} = 2,5 + 5,0 = 7,5$; $y_2^{(real)} = 2,4$; $y_3^{(real)} = 1,4 + 5,0 = 6,4$ м.

Ширины ЭВ: $dy_1 = 1,0$; $dy_2 = 0,8$ м; $dx_1 = dx_2 = dx_3 = 0,8$; $dx_4 = 1,0$, $dx_5 = 1,2$; $dx_6 = 0,8$ м.

В результате расчета после 50 внешних итераций оказалось, что оба крайних верхних ЭВ «прижаты» к торцам: $x_1^{(50)} = x_7^{(50)} = 0,01843$. Однако финальная конфигурация ЭВ оказалась не вполне симметричной относительно штрихованной вертикали O_1O_2 (оси симметрии) на рис. 2. А именно, $y_1 = 0,4075 \neq y_3 = 0,2304$;



$Rx_3 = 0,4423 \neq Lx - Rx_4 = 0,2632$ (здесь $Lx = 1$ безразмерная величина). Однако $Rx_2 = Lx - Rx_5$. Объяснение асимметрии связано с упомянутой в статье [1] не единственностью решения максимина.

Искомая величина $M_{xyR} = 0,113204$ реализована на «диагонали» $R_{3,1}$. Для существующего расположения ЭВ (real) эта величина $M_{xyR} = 0,080978$, т. е. меньше на 40 %.

Рис. 3. Расположение эвакуационных выходов в коридоре магазина. Кружки – эвакуационные выходы на верхней стороне коридора ($N_x = 6$; $N_y = 4$), кресты – эвакуационные выходы на нижней стороне коридора (в плане). Геометрические размеры даны в метрах

Заключение

Разработанная программа расчета может быть использована для оптимального проектирования эвакуационных выходов в зданиях усложненного коридорного типа (административных зданиях, торговых центрах и т. п.). Однако остается нерешенным вопрос о единственности решения, а именно, как число решений (при этом одинаковые или разные значения максимина имеют место) связано с количеством ЭВ, их четностью, является ли начальная конфигурация ЭВ (для старта МЛВ) параметром бифуркации, что влечет за собой наличие симметрии (N_x и N_y – четные, рис. 2) и др. Поэтому работу целесообразно продолжить.

Список литературы

1. О проектировании эвакуационных выходов в зданиях коридорного типа / Е.Н. Барановская, П.А. Леончук, С.А. Зуев, В.Г. Шамонин // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2021. № 2. С. 6–16.
2. Вариационные задачи механики и управления (Численные методы) / Ф.Л. Черноусько и др. М.: Изд-во «Наука», 1973. 238 с.

**Статья поступила в редакцию 01.06.2022;
одобрена после рецензирования 22.06.2022;
принята к публикации 06.07.2022.**

Шамонин Валерий Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, старший научный сотрудник. Тел. (495) 524-82-57. E-mail: K708@yandex.ru; **Зуев Станислав Анатольевич** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. Тел. (495) 524-83-45. E-mail: K708@yandex.ru; **Леончук Петр Алексеевич** – начальник сектора. Тел. (495) 524-82-09.

E-mail: pa.leonchuk@yandex.ru; **Хатунцева Светлана Юрьевна** – старший научный сотрудник. Тел. (495) 524-81-37. E-mail: K708@yandex.ru.

Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

Valeriy G. Shamonin – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Senior Researcher. Phone: 524-82-57. E-mail: K708@yandex.ru; **Stanislav A. Zuev** – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher. Phone: (495) 524-83-45. E-mail: K708@yandex.ru; **Petr A. Leonchuk** – Head of Sector. Phone: (495) 524-82-09. E-mail: pa.leonchuk@yandex.ru; **Svetlana Yu. Khatuntseva** – Senior Researcher. Phone: (495) 524-81-37. E-mail: K708@yandex.ru.

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.