

УДК 614.838.44:536.3

DOI: <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2025.18.28.001>

EDN: <https://elibrary.ru/atpyvc>

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭВАКУАЦИОННЫХ ВЫХОДОВ В ЗДАНИЯХ КОРИДОРНОГО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ТИПА. СХЕМА ИССЛЕДОВАНИЙ

Валерий Геннадьевич Шамонин, Алексей Викторович Голкин, Станислав Анатольевич Зувев, 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. Рассмотрена возможность решения задачи оптимального выбора эвакуационных выходов вдоль одной или обеих сторон криволинейных коридоров, обе стороны которого представляют собой дуги парабол для последующей минимизации смешения людских потоков (и, соответственно, предотвращения заторов при движении людей) при эвакуации в случае пожара или других чрезвычайных ситуациях. Рассмотрены вопросы вычисления расстояний между эвакуационными выходами на обеих границах коридора, локальная ширина коридора, разделение коридоров на широкие и узкие, а также применение метода локальных вариаций.

Ключевые слова: эвакуационный выход, координаты центров, число эвакуационных выходов, интегралы 2-го рода, метод локальных вариаций

Для цитирования: Проектирование эвакуационных выходов в зданиях коридорного параболического типа. Схема исследований / В.Г. Шамонин, А.В. Голкин, С.А. Зувев, С.Ю. Хатунцева // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2025. № 4 (26). С. 7–14. DOI 10.37657/vniipo.avpb.2025.18.28.001. EDN АТРУVC.

DESIGN OF EMERGENCY EXITS IN CORRIDOR-TYPE PARABOLIC BUILDINGS. RESEARCH SCHEME

Valery G. Shamonin, Alexey V. Golkin, Stanislav A. Zuev, 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. The possibility of solving the problem of optimal choice of evacuation exits along one or both sides of curved corridors, both sides of which are arcs of parabolas, is considered for subsequent minimization of mixing of human flows (and, accordingly, prevention of congestion during movement of people) during evacuation in case of fire or other emergency situations. The issues of calculating the distances between evacuation exits on both corridor borders, the local width of the corridor, the division of corridors into wide and narrow, as well as the application of the method of local variations are considered.

Keywords: evacuation exit, coordinates of centers, number of evacuation exits, 2nd kind integrals, local variations method

For citation: Shamonin V.G., Golkin A.V., Zuev S.A., Khatuntseva S.Yu. Design of emergency exits in corridor-type parabolic buildings. Research scheme. Aktual'nye voprosy pozharnoi bezopasnosti – Current Fire Safety Issues, 2025, no. 4, pp. 7-14. (In Russ.). DOI 10.37657/vniipo.avpb.2025.18.28.001. EDN ATPYVC.

Введение

Работа является продолжением семи предыдущих работ [1–7], посвященных проектированию криволинейных коридоров. Рассматривается вопрос о расположении эвакуационных выходов (ЭВ) по обеим сторонам коридора, в торцах которого имеется хотя бы один ЭВ, ведущий на лестничную клетку или в безопасную зону. Настоящая работа сложна в том отношении, что рассматриваемая область (коридор, рис. 1) не является выпуклой.

При отсутствии конкретных проектных решений по расположению ЭВ, обусловленных конфигурацией этажа, рассмотрены решения по определению максимальной удаленности ЭВ друг от друга для минимизации смешения людских потоков (и, соответственно, возникновения заторов и паники) при эвакуации в случае пожара или других чрезвычайных ситуаций.

В данной статье изложены отличия, характерные для эллиптических и параболических коридоров, в остальном алгоритм расчета характеристик параболических коридоров идентичен таковому для эллиптических [6, 7] и здесь не приводится. Указанные отличия следующие: расстояния между ЭВ (по длинам дуг парабол), локальная ширина коридора, разделение коридоров на широкие и узкие, а также особенности применения метода локальных вариаций (МЛВ) [8].

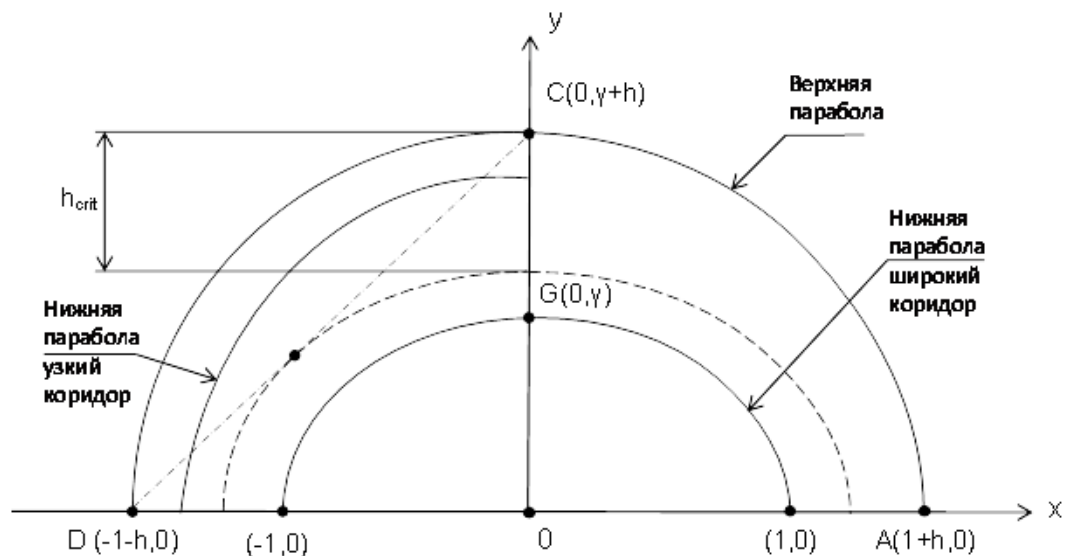


Рис. 1. Геометрическая иллюстрация разделения коридоров на широкие и узкие. Величины безразмерные

1. Вычисление длин дуг парабол

Обозначая индексами in (internal) и ex (external) внутреннюю и внешнюю параболы, запишем соотношения для их декартовых координат (рис. 2):

$$y_{in} = b(1 - x_{in}^2/a^2); y_{ex} = (b + h_p)[1 - x_{ex}^2/(a + h_p)^2]. \tag{1}$$

Здесь h_p обозначает некоторую среднюю (проектную) ширину коридора, a и b – полуоси внутренней параболы. Для удобства в формуле (1) и далее переходим к безразмерным геометрическим величинам с единым нормирующим фактором a (как и в статьях [6, 7]):

$$y_{in} = a\bar{y}_{in}, x_{in} = a\bar{x}_{in}, h_p = a\bar{h}_p. \tag{2}$$

Наконец, для краткости черточку (–) над безразмерными величинами далее, опустим. Тогда для безразмерных координат парабол имеем:

$$y_{in} = \gamma(1 - x_{in}^2); y_{ex} = (\gamma + h_p)[1 - x_{ex}^2/(1 + h_p)^2], \gamma = b/a. \quad (3)$$

Квадрат элемента дуги параболы: $(dS)^2 = (dx)^2 + (dy)^2 = (1 + y_x^2)(dx)^2$.

Подставляя сюда значения производных из (3), получим единую формулу:

$$dS = \sqrt{1 + \alpha^2 x^2} dx, \quad (4)$$

где для внутренней параболы $x = x_{in}$, $\alpha = \alpha_{in} = 2\gamma$, а для внешней

$$x = x_{ex}, \alpha = \alpha_{ex} = 2(\gamma + h_p)/(1 + h_p)^2.$$

Неопределенный интеграл по длине дуги является табличным:

$$\int \sqrt{1 + \alpha^2 x^2} dx = x \sqrt{1 + \alpha^2 x^2} / 2 + \ln [2 \alpha (\sqrt{1 + \alpha^2 x^2} + \alpha x)] / (2 \alpha). \quad (5)$$

Возможно, что вычисление разности правой части (5) для двух значений x экономичнее использования квадратурной формулы (в т. ч. Симпсона) в левой части выражения (5).

2. Локальная ширина коридора

Уравнение нормали к внутренней параболы в точке (x_{in}, y_{in}) :

$$X - x_{in} + dy_{in}/dx(Y - y_{in}) = 0.$$

Подставляя сюда $X = x_{ex}$, $Y = y_{ex}$, $dy_{in}/dx = -2\gamma x_{in}$, получим:

$$x_{ex} - x_{in} - 2\gamma x_{in}(y_{ex} - y_{in}) = 0. \quad (6)$$

Локальная ширина коридора (рис. 1):

$$h_*^2 = (x_{ex} - x_{in})^2 + (y_{ex} - y_{in})^2.$$

Подставляя сюда (6) и (3), получим более удобную формулу:

$$h_*^2 = (y_{ex} - y_{in})^2 (1 + \alpha_{in}^2 x_{in}^2) = (y_{ex} - y_{in})^2 (1 + 4\gamma^2 - 4\gamma y_{in}). \quad (7)$$

Для получения зависимости $y_{ex} = y_{ex}(y_{in})$ и последующей подстановки в (7) подставим x_{ex}^2 из формулы (6) во второе уравнение (3), и с учетом первого уравнения (3) получим квадратное уравнение относительно y_{ex} :

$$Ay_{ex}^2 + By_{ex} + C = 0, \quad (8)$$

$$A = 4\gamma^2; B = \gamma(1 + h_p)^2/[(\gamma + h_p)(\gamma - y_{in})] + 4\gamma(1 - 2\gamma y_{in});$$

$$C = 1 - 4\gamma y_{in}(1 - \gamma y_{in}) - \gamma(1 + h_p)^2/(\gamma - y_{in}).$$

Положительный корень уравнения (8):

$$y_{ex} = (\sqrt{B^2 - 4AC} - B)/(2A). \quad (9)$$

Можно показать, что $B > 0$, $C < 0$, так что формула (9) корректная. В проекте исходя из геометрических ограничений и эстетических соображений задаются величины a , h_p (размерные) и γ . Поскольку аналитическое исследование изменения h_* в диапазоне $0 \leq y_{in} \leq \gamma$ по формулам (7)–(9) весьма трудоемко, то оценку изменения толщины коридора можно осуществить расчетом h_* в 10–20 точках указанного диапазона.

3. Разделение коридоров

Критерий разделения параболических коридоров на широкие и узкие получается так же просто, как и для эллиптических [6]. Имеем (размерные величины):

$$y_{in} = b(1 - x_{in}^2/a^2) - \text{внутренняя парабола};$$

$$Y = (b + h_p)[1 + X/(a + h_p)] - \text{прямая } CD. \quad (10)$$

Для широкого коридора: $y_{in}(x) < Y(x)$, $-(a + h_p) \leq x \leq 0$.

Переходя к безразмерным переменным (деление на a) и опуская черточки, получим:

$$[x + 0,5(1 + h_p/\gamma)/(1 + h_p)]^2 + \Phi(h_p, \gamma) > 0,$$

где $\Phi(h_p, \gamma) = h_p/\gamma - 0,25[(1 + h_p/\gamma)/(1 + h_p)]^2$. (11)

При критической ширине коридора h_{crit} внутренняя парабола касается прямой CD в точке $x_{in} = x_t$; $y_{in} = y_t$; $X = x_t$; $Y = y_t$; индекс t (*tangent*) символизирует точку касания рис. 1.

На рис. 1 нижняя парабола для широкого коридора расположена под прямой CD , а для узкого – пересекает CD в двух точках E и F . Условие касания $dy_{in}/dx_{in}|_t = dY/dX|_t$ вместе с уравнениями (3) и (10) приводят к кубическому уравнению относительно h_{crit} : $\Phi(h_{crit}, \gamma) = 0$, где Φ определена уравнением (11), причем $x_t + 0,5(1 + h_{crit}/\gamma)/(1 + h_{crit}) = 0$.

4. Расчетные формулы для матричных элементов

4.1. Матричные элементы F_v для широких коридоров

В [6] представлены все необходимые формулы для эллиптических коридоров, необходима замена касательных к эллипсам касательными к внутренней параболе. Рассмотрим наиболее громоздкий фрагмент: координаты пересечения касательной к внутренней параболе из правого угла коридора (рис. 2 в статье [6]) с верхней параболой $A_3(x_3, y_3)$.

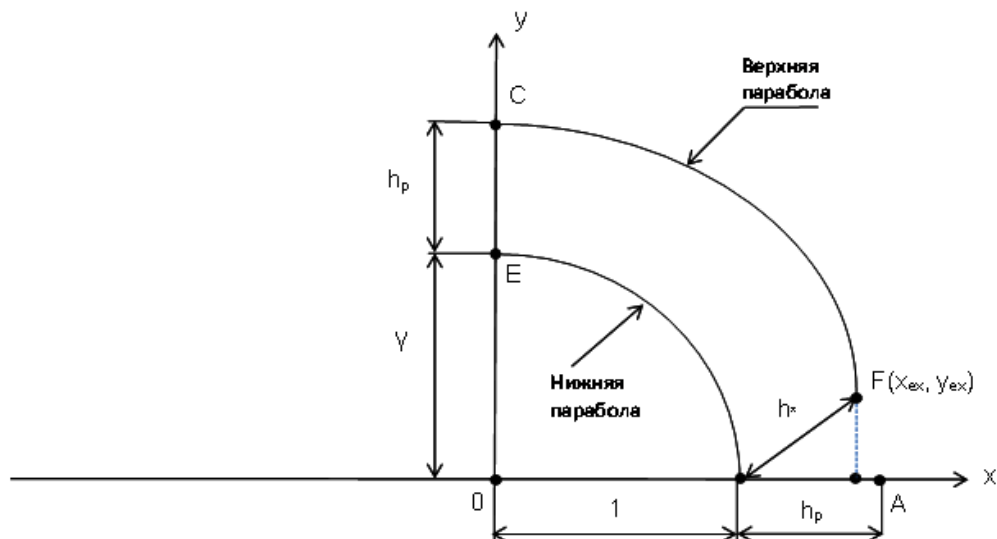


Рис. 2. Схематическое изображение правой половины параболического коридора непостоянной ширины. Координаты и толщины – безразмерные

Имеем [10] уравнение касательной к кривой $y = f(x)$:

$$Y - y = df/dx * (X - x) \text{ в точке } P(x_p, y_p). \quad (12)$$

Подставляя в выражение (12) $x = x_t$; $y = y_t = \gamma(1 - x_t^2)$; $Y = 0$; $X = 1 + h$; $dy/dx|_t = -2\gamma x_t$, получим $x_t^2 - 2(1 + h)x_t + 1 = 0$, положительный корень этого уравнения, удовлетворяющий неравенству $0 < x_t < 1$, это:

$$x_t = 1 + h - \sqrt{2h + h^2}. \quad (13)$$

Подставляя в формулу (12) вышеприведенные выражения для точки касания и $X = x_3$, $Y = y_3$, а также $x_t^2 = 2(1 + h)x_t - 1$ (вытекающего из (13)), получим:

$$y_3 + 2\gamma x_t x_3 - 2\gamma(1 + h)x_t = 0, [x_3/(1 + h)]^2 + [y_3/(\gamma + h)]^2 = 1. \quad (14)$$

Уравнение внешней параболы. (14) представляет собой систему уравнений относительно (x_3, y_3) .

4.2. Матричные элементы F_v для узких коридоров

В статье [5] перечислены условия 1) – 3), когда кратчайшими линиями, со-

единяющими ЭВ «верхнего» полуэллипса, будут хорды. Здесь условие 3) (определение координат точки A_3) исключается, поскольку оно предназначено для широкого коридора, а условие 2) ($x_A x_B > 0$, в [2].) усложняется (рис. 3).

Оба ЭВ расположены одновременно либо на левой (левее составной кривой $DFEC$), либо на правой стороне (правее составной кривой) $ABGC$ верхней параболы, что очевидно из визуального рассмотрения рис. 3. Все выкладки здесь аналогичны таковым в [7] (с заменой касательных к эллипсу к касательным к параболе (10),(12), где $dy/dx|_t = -2 \gamma x_t$.

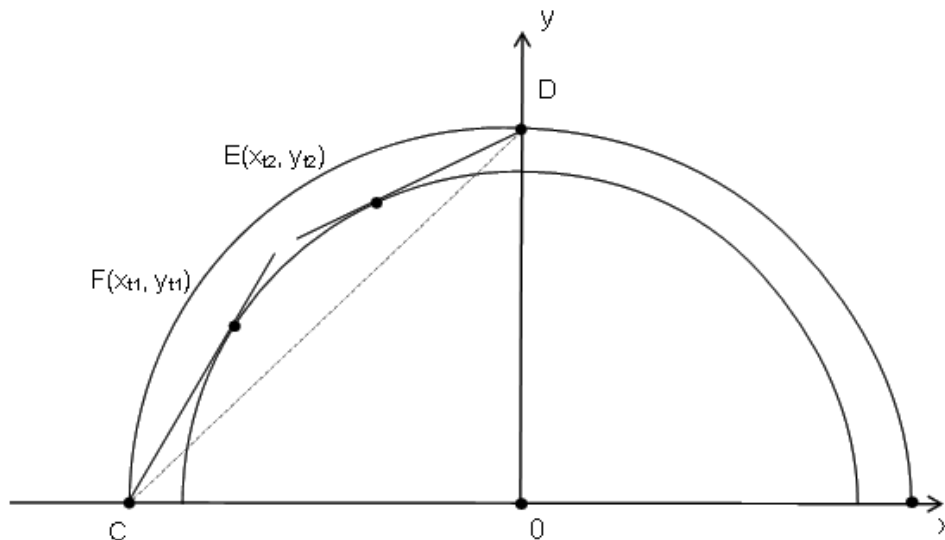


Рис. 3. Расстояние между ЭВ на верхней границе параболического узкого коридора

Используя (10) и (12) получим формулы для координат точек касания F и E (рис. 3):

$$x_{t1} = \sqrt{2h + h^2} - (1 + h); \quad y_{t1} = 2\gamma [(1 + h)\sqrt{2h + h^2} - (2h + h^2)];$$

$$x_{t2} = -\sqrt{h/\gamma}; \quad y_{t2} = \gamma - h.$$

Здесь и далее «аномально» широкие коридоры $\gamma < h$ или в размерном виде $b < h$ не рассматриваются, так как не имеют практического смысла.

Сформулированное выше условие имеет вид:

$$x \leq X_l(y) = \begin{cases} x_1(y) = x_{t1} - (y - y_{t1}) / (2\gamma x_{t1}), & 0 \leq y \leq y_{t1} \\ x_2(y) = -\sqrt{1 - y/\gamma}, & y_{t1} \leq y \leq y_{t2} \\ x_3(y) = x_{t2} - (y - y_{t2}) / (2\gamma x_{t2}), & y_{t2} \leq y \leq \gamma + h. \end{cases}$$

Здесь l символизирует координаты точек в левой (*left*) полуплоскости. Аналогично находятся координаты точек касания к составной кривой в правой полуплоскости (рис., символ r (*right*)):

$$x \geq X_r(y) = \begin{cases} x_1(y) = x_{t3} - (y - y_{t3}) / (2\gamma x_{t3}), & 0 \leq y \leq y_{t3} \\ x_2(y) = \sqrt{1 - y/\gamma}, & y_{t3} \leq y \leq y_{t4} \\ x_3(y) = x_{t4} - (y - y_{t4}) / (2\gamma x_{t4}), & y_{t4} \leq y \leq \gamma + h, \end{cases}$$

где $x_{t3} = -x_{t1}$; $y_{t3} = y_{t1}$; $x_{t4} = -x_{t2}$; $y_{t4} = y_{t2}$.

5. Матричные элементы F_{uv}

Получение расчетных формул для матричных элементов аналогично таковому для параболических коридоров [6] с заменой касательных к эллипсу на касательные к параболе, поэтому рассмотрим только фрагмент с наибольшими изменениями. А именно, рассмотрим рис. 3 в [6], где ЭВ на верхнем контуре на-

ходится на дуге $E_1 * E_2$. Однако для эллиптических коридоров $dy/dx(\pm 1) = \mp\infty$, а для параболических $dy/dx(\pm 1) = \mp 2\gamma$. Учет этого обстоятельства отражает рис. 4, где рассмотрим его левую половину.

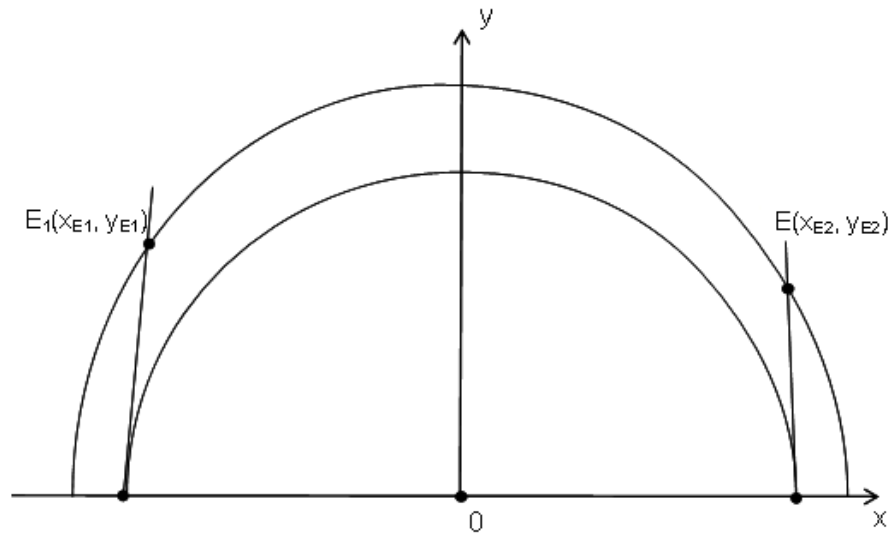


Рис. 4. Расстояние между ЭВ на верхней и нижней границах коридора

Уравнение касательной, проходящей через конец коридора (рис. 4): $y = 2\gamma(x + 1)$ позволяет найти координаты точки ее пересечения с внешней параболой:

$$E_1(x_{E1}, y_{E1}), -1 < x_{E1} < 0, \gamma < y_{E1} < \gamma + h.$$

Имеем, учитывая (3):

$$y_{E1} = 2\gamma(x_{E1} + 1) = (\gamma + h)[1 - x_{E1}^2/(1 + h)^2],$$

т. е. получаем квадратное уравнение:

$$x_{E1}^2 + 2Bx_{E1} + C = 0,$$

где обозначено: $B = \gamma(1 + h)^2/(\gamma + h)$, $C = (1 + h)^2(\gamma - h)/(\gamma + h)$.

Корни: $x_{E1}^{(\pm)} = -B \pm \sqrt{D}$, где дискриминант $D = (1 + h)^2 [\gamma^2(2h + h^2) + h^2]/(\gamma + h)^2 > 0$.

Имеем: $x_{E1}^{(-)} < 0$, можно показать, что также $x_{E1}^{(+)} < 0$ и что только $x_{E1}^{(+)} > -1$.

Имеем $x_{E1} = (1 + h)[\sqrt{\gamma^2(2h + h^2) + h^2} - \gamma(1 + h)]/(\gamma + h)$, $y_{E1} = 2\gamma(x_{E1} + 1)$.

Аналогично для правой полуплоскости (рис. 4) $x_{E2} = -x_{E1}$, $y_{E2} = y_{E1}$ (симметрия относительно оси Oy).

6. Локальные вариации

Аналогично [6] использование МЛВ [8] значительно проще и экономичнее, если варьировать не искомые конфигурационные переменные u_i и v_j , а осевые координаты x_{in} и x_{ex} . После цикла варьирования u_i и v_j вычисляются по формуле (5) и проверяются граничные условия 2.1 в статье [6].

Выводы

В представленной работе приведен алгоритм расчета для оптимального проектирования эвакуационных выходов в зданиях коридорного типа (административных, торговых центрах и т. п.) для коридоров в форме дуг парабол. Разработанный алгоритм далее будет использован для разработки соответствующей программы расчета.

Список литературы

1. Шамонин В.Г., Голкин А.В., Зубов С.А., Хатунцева С.Ю. Проектирование эвакуационных выходов в зданиях коридорного кольцевого типа. Широкий ко-

ридор // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2023. № 4 (18). С. 16–24. <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2023.13.77.002>.

2. Проектирование эвакуационных выходов в зданиях коридорного кольцевого типа. Узкий коридор / *А.В. Голкин, В.Г. Шамонин, С.А. Зуев, С.Ю. Хатунцева* // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2024. № 1 (19). С. 6–9. <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2024.20.45.001>.

3. Проектирование эвакуационных выходов в зданиях с коридорами эллиптической формы. Схема исследований / *А.В. Голкин, В.Г. Шамонин, С.А. Зуев, С.Ю. Хатунцева* // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2024. № 2 (20). С. 6–12. <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2024.96.61.001>.

4. Проектирование эвакуационных выходов в зданиях коридорного эллиптического типа. Ширина коридора / *А.В. Голкин, В.Г. Шамонин, С.А. Зуев, С.Ю. Хатунцева* // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2024. № 3 (21). С. 6–14. <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2024.69.92.001>.

5. Проектирование эвакуационных выходов в зданиях коридорного эллиптического типа. Геометрические характеристики коридора / *А.В. Голкин, В.Г. Шамонин, С.А. Зуев, С.Ю. Хатунцева* // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2024. № 4 (22). С. 8–14. DOI 10.37657/vniipo.avpb.2024.92.36.001. EDN AJZRLG.

6. Проектирование эвакуационных выходов в зданиях коридорного эллиптического типа. Алгоритм расчета широких коридоров / *В.Г. Шамонин, А.В. Голкин, С.А. Зуев, С.Ю. Хатунцева, П.А. Леончук* // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2025. № 2 (24). С. 34–42. DOI 10.37657/vniipo.avpb.2025.99.56.004. EDN IOTTGC.

7. Проектирование эвакуационных выходов в зданиях коридорного эллиптического типа. Алгоритм расчета узких коридоров / *В.Г. Шамонин, А.В. Голкин, С.А. Зуев, С.Ю. Хатунцева, П.А. Леончук* // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2025. № 3 (25). С. 16–19. DOI 10.37657/vniipo.avpb.2025.45.34.002. EDN FYSCXO.

8. *Черноусько Ф.Л.* и др. Вариационные задачи механики и управления (Численные методы). Москва: Наука, 1973. 238 с.

9. *Градштейн И.С.* и др. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Москва: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1971. 1108 с.

10. *Фихтенгольц Г.М.* Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 1. Москва: Наука, 1969. 800 с.

**Статья поступила в редакцию 26.08.2025;
одобрена после рецензирования 29.09.2025;
принята к публикации 27.10.2025.**

Шамонин Валерий Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: k708@yandex.ru; **Голкин Алексей Викторович** – заместитель начальника отдела. E-mail: 2102pro@mail.ru; **Зуев Станислав Анатольевич** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник; **Хатунцева Светлана Юрьевна** – начальник сектора. E-mail: lu2986@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.

Valery G. Shamonin – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher. E-mail: k708@yandex.ru; **Alexey V. Golkin** – Deputy Head of Department. E-mail: 2102pro@mail.ru; **Stanislav A. Zuev** – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher; **Svetlana Yu. Khatuntseva** – Chief of Sector. E-mail: lu2986@yandex.ru.

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