

УДК 614.838.44:536.3

DOI: <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2026.54.14.002>

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

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭВАКУАЦИОННЫХ ВЫХОДОВ В ЗДАНИЯХ КОРИДОРНОГО КРИВОЛИНЕЙНОГО ЭКВИДИСТАНТНОГО ТИПА. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА

Валерий Геннадьевич Шамонин, Алексей Викторович Голкин, Станислав Анатольевич Зуев, 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 криволинейного коридора, одна сторона которого представляет собой часть эллипса или параболы, а вторая – эквидистант (равноотстоящий контур) для последующей минимизации смешения людских потоков (и, соответственно, предотвращения заторов при движении людей) при эвакуации в случае пожара или других чрезвычайных ситуаций. Представлен алгоритм определения оптимального распределения эвакуационных выходов в коридор с точки зрения их максимальной удаленности друг от друга.

Ключевые слова: эвакуационный выход, криволинейный коридор, эквидистант, интерполяционный сплайн, метод локальных вариаций

Для цитирования: Проектирование эвакуационных выходов в зданиях коридорного криволинейного эквидистантного типа. Алгоритм расчета / В.Г. Шамонин, А.В. Голкин, С.А. Зуев, С.Ю. Хатунцева // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2026. № 3 (29). С. 14–20. DOI 10.37657/vniipo.avpb.2026.54.14.002. EDN JZUFBT.

DESIGN OF EVACUATION EXITS IN CORRIDOR CURVED EQUIDISTANT TYPE BUILDINGS. CALCULATION ALGORITHM

Valery G. Shamonin, Alexey V. Golkin, Stanislav A. Zuev, Svetlana Yu. Khatuntseva

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPPO), 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. There is considered the possibility of solving the problem of optimal selection of evacuation exits along one or both sides of a curved corridor, one side of which is a part of an ellipse or parabola, and the other is an equidistant (equi-spaced) contour, in order to subsequently minimize the mixing of human flows (and, accordingly, to prevent congestion in the movement of people) during evacuation in case of fire or other emergencies. An algorithm is presented for determining the optimal distribution of evacuation exits in a corridor in terms of their maximum distance from each other.

Keywords: evacuation exit, curved corridor, equidistant, interpolation spline, local variation method

For citation: Shamonin V.G., Golkin A.V., Zuev S.A., Khatuntseva S.Yu. Design of evacuation exits in corridor curved equidistant type buildings. Calculation algorithm.

Aktual'nye voprosy pozharnoi bezopasnosti – Current Fire Safety Issues, 2026, no. 3, pp. 14-20. (InRuss.). DOI 10.37657/vniipo.avpb.2026.54.14.002. EDN JZUFBT.

Введение

Оптимальное проектирование расположения эвакуационных выходов (далее – ЭВ) в зданиях коридорного типа, минимизирующее смешение людских потоков (и, соответственно, возникновение паники и заторов) при эвакуации в случае пожара или других чрезвычайных ситуаций, является актуальной проблемой. Задача усложняется применением в современных архитектурных решениях коридоров криволинейной формы. Авторами предлагаются математические решения для оптимального определения расположения ЭВ из помещений, максимально удаленных друг от друга. Рассматривается вопрос о расположении ЭВ по обеим сторонам коридора, в торцах которого имеется хотя бы один ЭВ, ведущий на лестничную клетку или в безопасную зону.

Для простых прямоугольных и кусочно-прямоугольных конфигураций коридоров решение вышеобозначенной проблемы представлено в журнале «Актуальные вопросы пожарной безопасности» № 3, 4 (2022 г.). При проектировании коридоров криволинейной конфигурации наиболее простой задачей является кольцевая конфигурация (две концентрические полуокружности), рассмотренная в № 4 (2023 г.) и № 1 (2024 г.) вышеуказанного журнала.

Во всех вышеперечисленных четырех работах для нахождения оптимального расположения ЭВ для сформулированной неклассической задачи $\max$ ($\min$) был использован численный вариант реализации с помощью метода локальных вариаций (МЛВ) [1].

Более сложными конфигурациями криволинейного коридора являются эллиптический и параболический типы, рассмотренные в работах [2–8], сложность еще обусловлена тем, что рассматриваемая область (коридор) не является выпуклой. Кроме того, как отмечено в статье [3], ширина эллиптического коридора не является постоянной величиной, на численном примере выявлено, что максимальное уширение достигает 20 %. В статье [4] для уменьшения ширины ЭВ предложена итерационная схема варьирования ширин h_0 и h_1 (на вершине и правом конце коридора соответственно) относительно проектной величины h_p .

В настоящей работе рассматривается коридор, нижняя граница («опорная») которого является эллипсом или параболой, а верхняя – эквидистантом, т. е. находящаяся на заданном расстоянии $h_p = \text{const}$ (рис. 1, 2).

1. Формулировка задачи

Уравнение нормали к плоской кривой $y = f(x)$ в декартовых координатах (т. е. прямой через точку касания перпендикулярно к касательной [9]):

$$X - x + y'_x(Y - y) = 0. \quad (1)$$

Полагая в статье (1):

$$X = x_{eq}, Y = y_{eq}, x = \xi(t), y = \eta(t),$$

где индекс eq символизирует равноудаленность, t – «время», параметр «опорного» контура, а также выражение для расстояния между этими точками:

$$h_p^2 = (x_{eq} - x)^2 + (y_{eq} - y)^2,$$

получим [10]:

$$\begin{cases} x_{eq}(t) = \xi(t) \pm h_p \eta(t)/Ds \\ y_{eq}(t) = \eta(t) \mp h_p \xi(t)/Ds, \end{cases} \quad (2)$$

где точка – общепринятый символ дифференцирования по t ;

$Ds = [\xi(t)^2 (\eta(t))^{1/2}]$, а знаки в статье (2) определяются расположением эквидистанта относительно «опорного» контура.

2.1. Коридор: эллипс–эквидистант

Уравнение эллипса в безразмерных координатах:

$$x^2 + y^2/\gamma^2 = 1,$$

где безразмерные координаты отнесены к полуоси a , $\gamma = b/a$ – отношение полуосей.

Параметрическое представление эллипса имеет вид:

$$\begin{cases} x = \cos t \\ y = \gamma \sin t \end{cases} \quad (3)$$

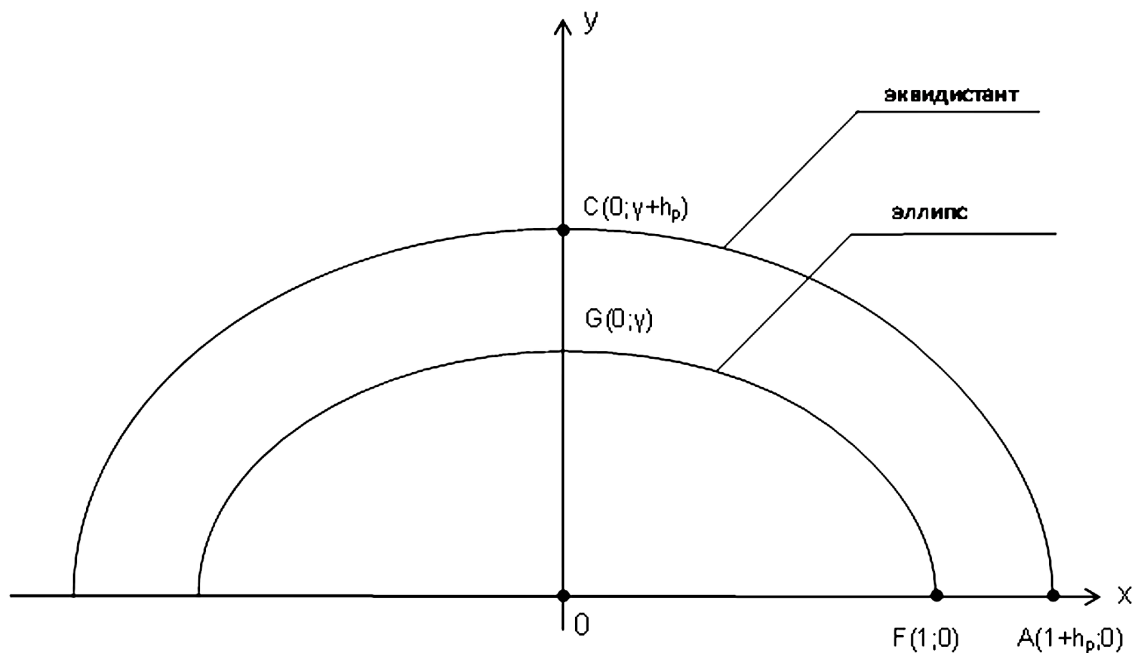


Рис. 1. Схематическое изображение разделения коридора (постоянной ширины) эллипс-эквидистант

Подставляя выражение (3) в формулу (2), получим:

$$Ds = \sqrt{1 - e^2 \cos^2 t} \text{ – элемент дуги эллипса,} \quad (4)$$

$$e = \sqrt{1 - \gamma^2} \text{ – эксцентриситет;}$$

$$x_{eq} = (1 + h_p \gamma / Ds) \cos t; y_{eq} = (\gamma + h_p / Ds) \sin t. \quad (5)$$

Дифференцируя зависимости (5) по t , получим:

$$\dot{x}_{eq} = -(1 + h_p \gamma / Ds) \sin t + h_p \gamma e^2 \sin 2t Ds^{-3/2} \cos t, \quad (6)$$

$$\dot{y}_{eq} = (\gamma + h_p / Ds) \cos t + h_p e^2 \sin 2t Ds^{-3/2} \sin t.$$

Элемент дуги эквидистанта вычисляется по формуле:

$$Ds_{eq} = [(\dot{x}_{eq})^2 + (\dot{y}_{eq})^2]^{1/2}. \quad (7)$$

Формулы (4) и (7) необходимы для вычисления интегралов $\int Ds dt$ и $\int Ds_{eq} dt$, задающих расстояния между ЭВ на эллиптической и эквидистантной границах коридора. И если первый – неполный эллиптический 2-го рода (для него можно использовать формулу Симпсона с автоматическим дроблением интервала интегрирования), то для второго такая же процедура связана с расходом зна-

чительно большего времени. Это связано с длительным процессом итераций в МЛВ. Поэтому могут возникнуть неудобства при расчетах на маломощных ПК или ноутбуках. Для преодоления этого возможного осложнения можно упростить формулу (7).

Как было отмечено в статье [2], можно использовать кубический интерполянт (наиболее распространенный в настоящее время) для Ds_{eq} [11].

Однако, как отмечено в статье [2], как для эллипса, так и для эквидистанта возникает осложнение: $d^2y/dx^2 \rightarrow -\infty$, $x \rightarrow 1$ (рис. 1). Поэтому в статье [2] было предложено строить комбинированный интерполянт: на отрезке $[0; x_M]$ $y = y(x)$, а на отрезке $[x_M; 1]$ $x = x(y)$, (x_M, y_M) – точка сопряжения (рис. 1). Однако использование кубического интерполянта не представляется целесообразным по двум причинам. Во-первых, как указано в работе [11], для его «работы» необходимо задать (хотя бы оценочные) значения вторых производных на границах интервала. А дифференцирование по t (6) приведет к весьма громоздким выражениям. Во-вторых, производная кубического полинома – полином 2-й степени $dy/dx = P_2(x)$ и $Ds_{eq} = P_4(x)$ – полином 4-й степени, и интеграл $\int_0^{x_M} P_4(x)dx$ (отсутствующий в справочниках, например, в работе [12]) остается вычислять только численно, например, по формуле Симпсона. Аналогично – для отрезка $[x_M; 1]$.

Альтернативная возможность – это использование квадратичных (параболических) сплайнов [13, 14].

В узлах сетки x_n ($1 \leq n \leq N$) заданы значения y_n . Параболический сплайн общего вида: $S_n(x) = a_n + b_n(x - x_n) + c_n(x - x_n)^2$, $x_n \leq x \leq x_{n+1}$, $1 \leq n \leq N - 1$. Из требования непрерывности сплайна и его первой производной в узлах интерполяции в выписаны соотношения для коэффициентов, далее соответствующие рекуррентные соотношения для коэффициентов b_n и c_n . Оставшийся свободный параметр $b_N = dS/dx(x_N)$ авторы [13, 14] предлагают оценить из требования минимума квадрата второй производной сплайна. Получена оценочная формула для b_N в виде отношения двух рядов, содержащих y_n , $h_n = x_{n+1} - x_n$ и так называемые весовые множители $\rho_n = O(1)$.

Но в нашем случае проще воспользоваться точной формулой:

$$b_N = dy_{eq}/dx_{eq} = \dot{y}_{eq}/\dot{x}_{eq}.$$

Все сказанное относится к отрезку $[0, x_M]$, где $N = N_1$ – число узловых значений эквидистанта (узлов интерполяции) на этом отрезке. Аналогично для правого отрезка $[x_M; 1]$:

$$N = N_2, \hat{S}_n(y) = \tilde{a}_n + \tilde{b}_n(y - y_n) + \tilde{c}_n(y - y_n)^2, \tilde{b}_{N2} = \dot{x}_{eq}/\dot{y}_{eq}.$$

Отличие рассматриваемого коридора от предыдущих [2–6], где обе стороны – эллипсы, внешняя граница – эквидистант, подготовительные процедуры для старта МЛВ идентичны: разделение коридоров на широкие и узкие – согласно работам [4, 5], формулировка $\max$ ($\min$), граничные условия, матричные элементы Fv и Fuv , начальное приближение и пр. и поэтому не приводятся.

2.2. Коридор: парабола–эквидистант

Уравнение параболы [7] $y = b(1 - x^2/a^2)$ и последующие для эквидистанта приводим к безразмерному виду, относя все размеры к a и переходя к параметрическому представлению (рис. 2):

$$\begin{cases} x = \xi(t) = t, \\ y = \eta(t) = \gamma(1 - t^2). \end{cases} \quad (8)$$

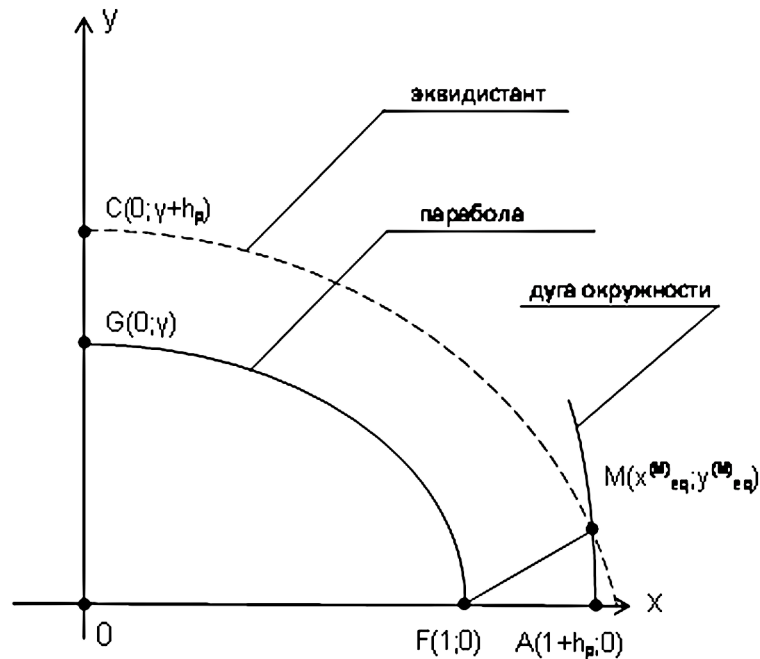


Рис. 2. Схематическое изображение правой половины коридора (постоянной ширины) параболы – эквидистант

Подставляя выражение (8) в формулу (2) и выбирая знак $-$, получим формулы для эквидистантной границы:

$$x_{eq} = t(1 + 2h_p\gamma/Ds)\cos t; y_{eq} = \gamma(1 - t^2) + h_p/Ds, \quad (9)$$

где $Ds = [1 + 4\gamma^2 t^2]^{1/2}$.

Дифференцируя соотношения (9), получим:

$$\begin{cases} \dot{x}_{eq} = 1 + 2h_p\gamma(1 - t\dot{D}s/Ds)/Ds, \\ \dot{y}_{eq} = -(2\gamma t + h_p\dot{D}s/Ds^2). \end{cases} \quad (10)$$

где $\dot{D}s = 4\gamma^2 t/Ds$.

Аналогично эллиптическому контуру элемент дуги эквидистанта вычисляется по формуле (7).

Как видно из рис. 2, дуга эквидистанта CM заканчивается в точке $M(x_{eq}^{(M)}, y_{eq}^{(M)})$, координаты которой согласно формулам (9) равны (так как $t = 1$):

$$x_{eq}^{(M)} = 1 + 2h_p\gamma/D_1; y_{eq}^{(M)} = h_p/D_1; D_1 = \sqrt{1 + 4\gamma^2}. \quad (11)$$

Поскольку наклон касательной к эквидистанту в конце участка (окрестности точки M) не стремится к вертикали, т. е. $\dot{y}_{eq}/\dot{x}_{eq} \neq -\infty$, то нет необходимости построения комбинированного параболического интерполянта.

Возникает вопрос: как продлить эквидистантный контур до пересечения с осью Ox в точке A (по желанию проектировщика)?

Напрашивается идея о рассмотрении наряду с исходной параболой $y = \gamma(1 - x^2)$ рассмотреть внешнюю $y_{ex} = (\gamma + h_0)[1 - x_{ex}^2/(1 + h_1)^2]$, проходящую на участке MA . Однако, условия того, что внешняя парабола проходит через точку M и в этой точке касательные к обеим кривым совпадают, т. е. $dy_{ex}/dx_{ex} = dy_{eq}/dx_{eq}$, приводит к очень громоздкой системе нелинейных алгебраических уравнений относительно параметров h_0 и h_1 . Поэтому ввиду предполагаемой малости длины участка MA по сравнению с длиной дуги эквидистанта CM целесообразно аппроксимировать этот участок дугой окружности радиуса h_p с центром в точке

$F(1; 0)$, рис. 2. Тогда координаты точки A : $x_A = 1 + h_p$, $y_A = 0$.

Подготовительные процедуры для старта МЛВ идентичны описанным в разделе 2.1 со ссылкой на публикацию [7].

Выводы

В представленной работе приведен алгоритм расчета для оптимального проектирования эвакуационных выходов в зданиях коридорного эквидистантного типа (административных, торговых центрах и т. п.), в частности для коридоров в форме полуэллипс (полупарабола) вкупе с эквидистантной кривой. Разработанный алгоритм может быть положен в основу разработки соответствующей программы расчета.

Список литературы

1. Черноусько Ф.Л. и др. Вариационные задачи механики и управления (Численные методы). Москва: Изд-во «Наука», 1973. 238 с.
2. 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>.
3. 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>.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Проектирование эвакуационных выходов в зданиях коридорного параболического типа. Схема исследований / В.Г. Шамонин, А.В. Голкин, С.А. Зуев, С.Ю. Хатунцева // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2025. № 4 (26). С. 7–14. DOI 10.37657/vniipo.avpb.2025.18.28.001. EDN ATPYVC.
8. Проектирование эвакуационных выходов в зданиях коридорного криволинейного типа. Возможность уточнения ширины коридора / В.Г. Шамонин, А.В. Голкин, С.А. Зуев, С.Ю. Хатунцева // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2026. № 1 (27). С. 7–12. DOI 10.37657/vniipo.avpb.2026.55.83.001. EDN CJFJRL.
9. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 1. Москва: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1966. 608 с.
10. Валишин А.А. и др. Компьютерное построение сети эквидистант сложных негладких кривых на местности // Математическое моделирование и численные методы. 2020. № 2. С. 95.

11. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. Москва: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1980. 536 с.
12. Градштейн И.С. и др. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений // Москва: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1971. 1108 с.
13. Калиткин Н.Н. и др. Естественные параболические интерполяционные сплайны // Препринт № 131 ИПМ АН СССР. Москва, 1985. 29 с.
14. Калиткин Н.Н. и др. Естественные параболические интерполяционные сплайны // Матем. моделирование. Т. 1. № 11. С. 100.

Статья поступила в редакцию 19.05.2026;

одобрена после рецензирования 19.06.2026;

принята к публикации 20.07.2026.

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 (VNIIPPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.