

*В.Ю. Беляев, преподаватель, НУГЗУ,
О.В. Стаховский, д.т.н., профессор, зав. каф., ФВП НТУ ХПИ,
А.А. Тарасенко, д.т.н., с.н.с., вед. научн. сотр., НУГЗУ*

АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ЭКСТРЕННОЙ ЭВАКУАЦИИ НАСЕЛЕНИЯ

Предложена модель оптимального маршрута эвакуации населения по пересеченной местности в отсутствии транспортной сети. Ее реализация в виде итерационного алгоритма бегущей волны применительно к границе области транспортной достижимости позволяет учесть особенности реальной обстановки в зоне чрезвычайной ситуации.

Ключевые слова: эвакуация населения, пути эвакуации, модели оптимального пути эвакуации.

Постановка проблемы. Усложнение техногенной сферы и повышение ее потенциальной опасности, а также рост плотности населения приводят к росту рисков значительных человеческих потерь в результате возникновения масштабных природных и техногенных чрезвычайных ситуаций и катастроф.

Одним из путей уменьшения человеческих потерь является эвакуация населения из зон влияния поражающих факторов ЧС. Чаще всего эвакуация осуществляется наземными видами транспорта (как правило, автомобильного) и пешим порядком.

Одним из компонентов разрабатываемых планов эвакуации являются маршруты эвакуации. Маршруты эвакуации должны быть проложены таким образом, чтобы вывести в кратчайшие сроки население из зоны действия поражающих факторов ЧС, обеспечив сохранность жизни и здоровья эвакуируемых. Наземная эвакуация, как правило, осуществляется по сети дорог, но в конкретных случаях возможны ситуации, когда в результате развития ЧС осуществление эвакуации по сети дорог может быть невозможным или небезопасным.

Так, экстренная эвакуация по сети дорог может оказаться неэффективной в случае катастрофических затоплений, поскольку большинство дорог, ведущих в населенный пункт, проходит по затапливаемым долинам, а скорость движения волны прорыва превосходит скорость движения автотранспорта. Т.е. эвакуация по бездорожью, в том числе пешая, может оказаться более эффективной, нежели эвакуация автотранспортом по дорогам.

Аналогичная ситуация возможна при масштабном аварийном распространении тяжелого отравляющего вещества (газа) в результате техногенной аварии, а также в случае угрозы населенному пункту со стороны масштабного природного пожара.

Наиболее сложной является проблема прокладки оптимального маршрута экстренной эвакуации для населенных пунктов, расположенных в местности со сложной топографией. Поскольку очевидно, что на скорость движения при эвакуации оказывают влияние такие факторы как локальные значения крутизны склона, тип грунта или иной подстилающей поверхности вдоль маршрута.

На данный момент данный вопрос не нашел разрешения и, таким образом, решение проблемы нахождения оптимальных маршрутов экстренной эвакуации населения с учетом реальных топографических и ландшафтных условий в отсутствие транспортной сети является актуальным.

Анализ последних исследований и публикаций. Осуществляя решение поставленной задачи, был проделан обзор научных работ, посвященных моделированию маршрутов эвакуации.

Выявлено, что существуют модели маршрутов эвакуации, описывающие движение эвакуационных колонн по городским улицам [1-3], целью эвакуации при этом является вывод населения за пределы населенного пункта. Математическим аппаратом данных моделей является оптимизация на графах и предназначены они для расчета оптимальных путей эвакуации в первую очередь из крупных городов. Данная задача нашла свое решение в различных постановках.

Также существует ряд моделей оптимальной маршрутизации в условиях бездорожья [4-6], математическим аппаратом которых являются либо сетевые (решеточные) модели, либо вариационные модели.

Данные модели, более предыдущих, соответствуют поставленной цели, но для них характерен ряд недостатков.

В частности, вариационные модели позволяют решать задачу маршрутизации лишь в наиболее упрощенной постановке и являются непродуктивными при осуществлении попытки решить задачу в условиях обстановки реальной.

Общим недостатком решеточных моделей является низкая точность учета локальных значений ландшафтных параметров, связанная с использованием растровых электронных карт местности, что приводит к существенным погрешностям при отыскании оптимального маршрута эвакуации; отсутствие учета динамики поражающих факторов ЧС; решеточный характер искомого маршрута (получение маршрута на сети типа Манхэттен).

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является создание нерешеточной имитационной модели оптимального маршрута эвакуации, учитывающей локальные значения топографических параметров. В основу модели положена итерационная процедура нахождения изохроны области транспортной достижимости.

Основным допущением модели является независимость результатов моделирования от влияния случайных факторов (детерминированность). Учет реальной обстановки в предлагаемой модели основан на ис-

пользовании не растровой, а векторно-функциональной ГИС-модели местности (ВФММ) [7], что на порядок снижает объем обрабатываемой информации.

На первом этапе предлагается математическая модель, описывающая зависимость азимутальной скорости движения автосредства, осуществляющего экстренную эвакуацию населения населенного пункта, от его тактико-технических характеристик и локальных значений параметров местности. Затем предложена математическая модель поиска оптимального маршрута эвакуации, и ее реализация в виде итерационного алгоритма бегущей волны применительно к границе области транспортной достижимости, позволяющая учесть особенности реальной обстановки в зоне чрезвычайной ситуации.

Учет подстилающей поверхности при задании скорости движения автосредства, осуществляющего эвакуацию населения в условиях бездорожья, предлагается [8] осуществлять в виде задания пространственного поля

$$V(x, y) = k_v(x, y) \cdot v_n, \quad (1)$$

где $k_v(x, y)$ ($0 \leq k_v \leq 1$) – коэффициент влияния свойств подстилающей поверхности или грунта (задается в виде ВФММ); v_n (км/ч) – номинальная скорость автосредства (АС).

Задавая уравнение поверхности рельефа $Z(x, y)$ [7], можно в каждой точке найти градиент высоты рельефа ψ , крутизну склона α_∇ и угол склона в произвольном азимутальном направлении.

Угол ψ (радианы) ($0 \leq \psi \leq 2\pi$) азимута градиента высоты поверхности рельефа $Z(x, y)$, отмеряемый в положительном направлении от оси ОХ

$$\psi(x, y) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\partial Z(x, y)}{\partial y}, \frac{\partial Z(x, y)}{\partial x} \right). \quad (2)$$

Угол крутизны α_∇ (радианы) ($0 \leq \alpha_\nabla \leq \pi/2$) склона поверхности рельефа $Z(x, y)$ в направлении ψ , отмеряемый от плоскости ХОУ

$$\alpha_\nabla = \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\left(\frac{\partial Z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial Z(x, y)}{\partial y} \right)^2} \right). \quad (3)$$

Угол склона ($-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$) в зависимости от азимутального направления φ

$$\alpha(x; y; \varphi) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\partial Z(x, y)}{\partial x} \cos \varphi + \frac{\partial Z(x, y)}{\partial y} \sin \varphi \right), \quad \varphi \in [0; 2\pi]. \quad (4)$$

Решая известное выражение (5) для необходимой мощности авто-средства, движущегося вверх и вниз по склону, относительно v_n , найдем скорость движения автосредства (6) в произвольном азимутальном направлении φ и произвольной крутизне склона α , т.е. индикатрису скорости движения АС

$$p = \frac{v}{q_1 \cdot \eta_T} \cdot \left[g \cdot m_a \cdot (f \pm \operatorname{tg} \alpha_{\nabla}) + \frac{k_B \cdot c \cdot b \cdot v^2}{q_2} \right], \quad (5)$$

где p – мощность двигателя автомобиля (кВт); v – номинальная скорость движения автомобиля (км/ч); η_T – КПД трансмиссии; g – ускорение силы тяжести (м/с^2); m_a – масса автомобиля (т); f – коэффициент сопротивления качению; α_{∇} – угол склона (градусы); k_B – коэффициент сопротивления воздуха ($\text{Нс}^2/\text{м}^4$); c – высота автомобиля (м); b – ширина автомобиля (м); $q_1=3,6$; $q_2=13000$

$$v_{1,2} = \frac{\sqrt[3]{12} \left(\sqrt[3]{12} A^2 B_{1,2} C - \sqrt[3]{A^4 C^4 \left(9p + \sqrt{(12B_{1,2}^3 A^2 + 81P^2 C)/C} \right)^2} \right)}{6AC \sqrt[3]{A^2 C^2 \left(9p + \sqrt{(12B_{1,2}^3 A^2 + 81P^2 C)/C} \right)}}, \quad (6)$$

где $A = 1/(q_1 \cdot \eta_T)$; $B_{1,2} = g \cdot m_a \cdot (f \pm \operatorname{tg} \alpha_{\nabla})$; $C = k_B \cdot h \cdot b/q_2$.

В виду различия в скорости движения вверх и вниз по склону, функция будет иметь кусочный характер

$$v(x, y, \varphi, \alpha_{\nabla}, w) = \begin{cases} v_1, & 0 \leq \varphi < \pi/2; \\ v_2, & \pi/2 \leq \varphi < 3\pi/2; \\ v_1, & 3\pi/2 \leq \varphi < 2\pi. \end{cases} \quad (7)$$

График индикатрисы в цилиндрической системе координат приведен на рис. 1. По графику видно, что скорость очень быстро падает с ростом крутизны склона в направлении градиента рельефа и против него и не изменяется в перпендикулярном направлении, т.е. при движении по косоугору.

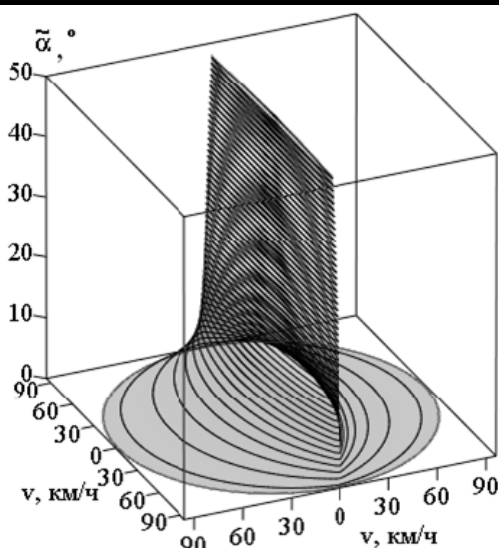


Рис. 1. График зависимости $v_n(\tilde{\alpha}; \varphi)$ в цилиндрических координатах

Однако полученные зависимости (6-7) не позволяет аналитически реализовать принцип Гюйгенса, поэтому в работе предложено осуществить аппроксимацию выражения (7) уравнениями окружностей (рис. 2).

Осуществим данную аппроксимацию через три известные точки для каждой из окружностей, а также осуществив поворот индикатрисы в направлении градиента рельефа, получим уравнение аппроксимации индикатрисы в глобальной системе координат, заданы выражениями (8-10)

$$V_n^*(x, y, \varphi) = \begin{cases} V_{nx}^* = x + v_n^* \cos \varphi; \\ V_{ny}^* = y + v_n^* \sin \varphi, \end{cases} \quad \varphi \in [0; 2\pi], \quad (8)$$

где v_n^* – полярное уравнение проекции индикатрисы на плоскость XOY .

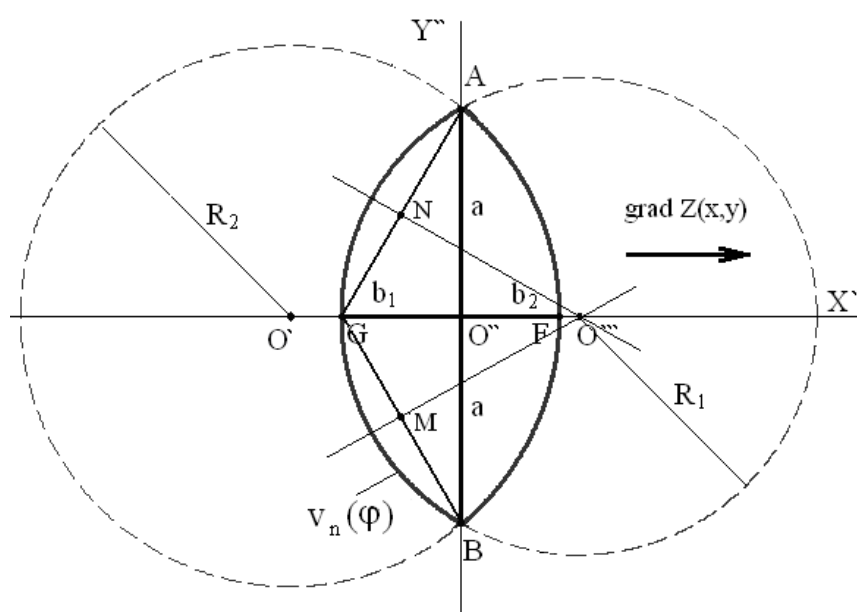


Рис. 2. Аппроксимация индикатрисы $v_n(\varphi)$ дугами окружностей

$$v_n^* = \begin{cases} \begin{cases} v_1^*, & \varphi \leq \pi/2 + \psi; \\ v_2^*, & \varphi \leq 3\pi/2 + \psi; \\ v_1^*, & \varphi \leq 2\pi; \end{cases} & 0 \leq \psi < \pi/2; \\ \begin{cases} v_2^*, & \varphi \leq -\pi/2 + \psi; \\ v_1^*, & \varphi \leq \pi/2 + \psi; \\ v_2^*, & \varphi \leq 2\pi; \end{cases} & \pi/2 \leq \psi < 3\pi/2; \\ \begin{cases} v_1^*, & \varphi \leq -3\pi/2 + \psi; \\ v_2^*, & \varphi \leq -\pi/2 + \psi; \\ v_1^*, & \varphi \leq 2\pi; \end{cases} & 3\pi/2 \leq \psi < 2\pi, \end{cases} \quad (9)$$

где v_1^* и v_2^* – полярные уравнения окружностей

$$v_{1,2}^* = \frac{(b_{2,1}^2 - a^2) \cos(\varphi - \psi) \pm \sqrt{(b_{2,1}^2 + a^2)^2 - (b_{2,1}^2 - a^2) \sin^2(\varphi - \psi)}}{2b_{1,2}}, \quad (10)$$

где $a = v_n^*(\pm\pi/2)$ – скорость движения перпендикулярно склону; $b_2 = v_n(0) \cdot \cos \alpha$ – величина проекции на плоскость XOY скорости движения вверх по склону; $b_1 = v_n(\pi) \cdot \cos \alpha$ – величина проекции на плоскость XOY скорости движения вниз по склону, φ – полярный угол, ψ – угол поворота оси $O''X''$ к оси OX .

В работе [8] выяснена погрешность данной аппроксимации - относительная не превышает 4%, абсолютное отклонение в азимуте маршрута не превышает $1,5^\circ$. Таким образом, проведенная аппроксимация не вносит каких-либо существенных искажений в модель.

Промежуточный вид в глобальной системе координат индикатриса примет в виде выражения (8) с компонентами (9)-(10).

Однако в данном представлении не учтены ограничения на движение автосредства, связанные с невозможностью преодоления слишком крутого подъема и с устойчивостью автомобиля на поверхности рельефа при его движении в произвольном направлении.

Данная задача была решена в работе [8] аналитически, что существенно сокращает время выполнения операций, в сравнении с численными решениями, имеющими место у предшественников.

Найдя разрешенные интервалы азимута движения (11-12), получим окончательное выражение для индикатрисы скорости (формула (13)). При этом полагается, что скорость в запрещенных направлениях движения равна 0.

а) ограничения по предельной крутизне склона $\alpha_{кр}$.

Решение уравнения $\alpha_{кр} = \alpha(\varphi)$ (где $\alpha(\varphi)$ – из выражения (4)) относительно φ

$$\varphi_{кр}^{1,2} = \arctg \left(-\frac{Z_x}{Z_y} \frac{\left(Z_x \operatorname{tg} \alpha_{кр} \pm \sqrt{Z_x^2 Z_y^2 - Z_y^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_{кр} + Z_y^4} \right)}{Z_x^2 + Z_y^2} + \frac{\operatorname{tg} \alpha_{кр}}{Z_y}; \right. \\ \left. \frac{Z_x \operatorname{tg} \alpha_{кр} \pm \sqrt{Z_x^2 Z_y^2 - Z_y^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_{кр} + Z_y^4}}{Z_x^2 + Z_y^2} \right), \quad (11)$$

где $Z_x = \frac{\partial Z(x, y)}{\partial x}$, $Z_y = \frac{\partial Z(x, y)}{\partial y}$.

Запрет на движение в азимутальном интервале $[\varphi_{кр}^1; \varphi_{кр}^2]$.

б) ограничения по устойчивости АС на поверхности рельефа

$$\varphi_{12}^1 = \arctg(-E_1 Z_x - F_1 Z_y; E_1 Z_y - F_1 Z_x);$$

$$\varphi_{12}^2 = \arctg(-E_1 Z_x + F_1 Z_y; E_1 Z_y + F_1 Z_x);$$

$$\varphi_{12}^3 = \arctg(E_1 Z_x + F_1 Z_y; -E_1 Z_y + F_1 Z_x);$$

$$\varphi_{12}^4 = \arctg(E_1 Z_x - F_1 Z_y; -E_1 Z_y - F_1 Z_x),$$

где $E_1 = A(b + 2b_c)$; $F_1 = \sqrt{4c_c^2(Z_x^2 + Z_y^2) - (b + 2b_c)^2}$;

$$\varphi_{34}^1 = \arctg(E_3 Z_x + F_3 Z_y; -E_3 Z_y + F_3 Z_x);$$

$$\varphi_{34}^2 = \arctg(E_3 Z_x - F_3 Z_y; -E_3 Z_y - F_3 Z_x);$$

$$\varphi_{34}^3 = \arctg(-E_3 Z_x + F_3 Z_y; E_3 Z_y + F_3 Z_x);$$

$$\varphi_{34}^4 = \arctg(-E_3 Z_x - F_3 Z_y; E_3 Z_y - F_3 Z_x),$$

где $E_3 = A(b - 2b_c)$; $F_3 = \sqrt{4c_c^2(Z_x^2 + Z_y^2) - (b - 2b_c)^2}$;

$$\varphi_{23}^1 = \arctg(E_2 Z_y + F_2 Z_x; E_2 Z_x - F_2 Z_y);$$

$$\varphi_{23}^2 = \arctg(E_2 Z_y - F_2 Z_x; E_2 Z_x + F_2 Z_y);$$

$$\varphi_{23}^3 = \arctg(-E_2 Z_y + F_2 Z_x; -E_2 Z_x - F_2 Z_y);$$

$$\varphi_{23}^4 = \arctg(-E_2 Z_y - F_2 Z_x; -E_2 Z_x + F_2 Z_y),$$

где $E_2 = A^{-1}(a + 2a_c)$; $F_2 = \sqrt{4c_c^2(Z_x^2 + Z_y^2) - (a + 2a_c)^2}$;

$$\varphi_{41}^1 = \arctg(-E_4 Z_y + F_4 Z_x; -E_4 Z_x - F_4 Z_y);$$

$$\varphi_{41}^2 = \arctg(-E_4 Z_y - F_4 Z_x; -E_4 Z_x + F_4 Z_y);$$

$$\varphi_{41}^3 = \arctg(E_4 Z_y + F_4 Z_x; E_4 Z_x - F_4 Z_y);$$

$$\varphi_{41}^4 = \arctg(E_4 Z_y - F_4 Z_x; E_4 Z_x + F_4 Z_y),$$

$$\text{где } E_4 = A^{-1}(a - 2a_c); F_4 = \sqrt{4c_c^2(Z_x^2 + Z_y^2) - (a - 2a_c)^2}. \quad (12)$$

При этом координаты центра масс $(c_a; c_b; c_c)$ заданы относительно правой задней опоры, $0 \leq c_a \leq a$; $0 \leq c_b \leq b$; $0 \leq c_c \leq c$, a – длина, b – ширина, c – высота АС.

Индикатриса скорости с учетом ограничений (11)-(12) принимает вид

$$V = V_n^* \sum_{i=1}^I [\eta(\varphi - \varphi_{2i-1}) - \eta(\varphi - \varphi_{2i})], \quad (13)$$

где $\eta(\varphi)$ – функция Хэвисайда.

На рис. 3 показан пример индикатрисы с разрешенными направлениями движения.

Поскольку параметры рельефа различны в разных точках местности, то индикатриса будет определяться точкой задания ее полюса.

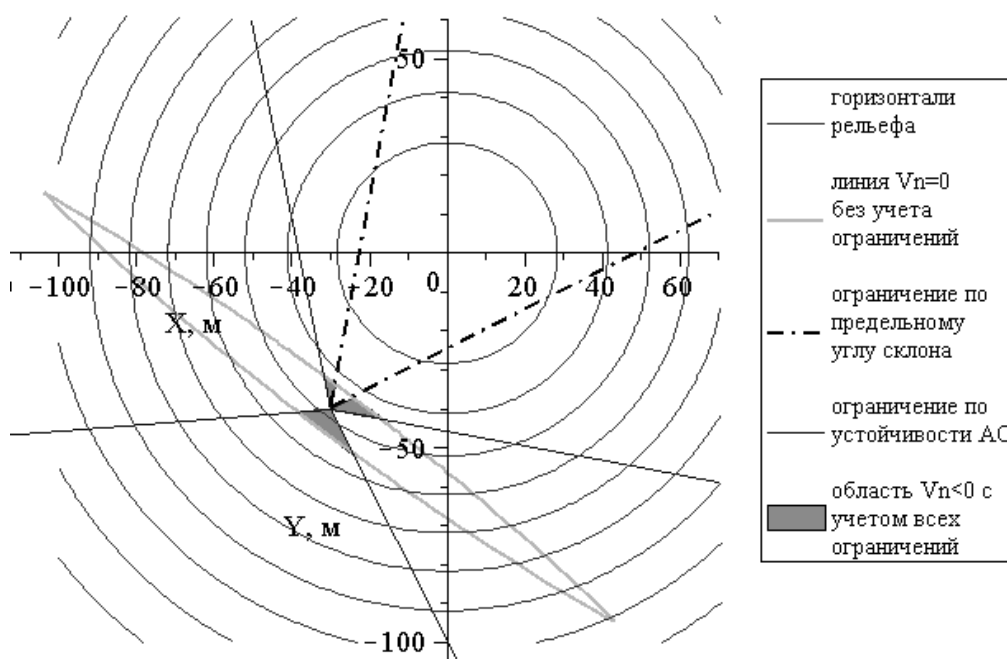


Рис. 3. Изображение индикатрисы $V(\varphi, Z(x, y), w)$ скорости движения АС с учетом ограничений на предельную крутизну и устойчивость на поверхности рельефа

На рис. 4 приведен пример поля индикатрис. Видно, что индикатриса может принимать форму близкую к окружности на равнинном участке и вырождаться в точку на очень крутом склоне.

Получив поле индикатрис, можно осуществить итерационное построение контура области транспортной достижимости.

С этой целью необходимо задать индикатрисы в точках предыдущего контура, как это показано на рис. 5. На данном рисунке модельный контур задан окружностью.

Использование волнового алгоритма для построения маршрутов эвакуации населенного пункта в условиях бездорожья предполагает реализацию принципа Гюйгенса, т.е. получение огибающей к множеству индикатрис. Для этого необходимо найти такой полярный угол, при котором касательная к индикатрисе будет параллельна касательной к самому контуру.

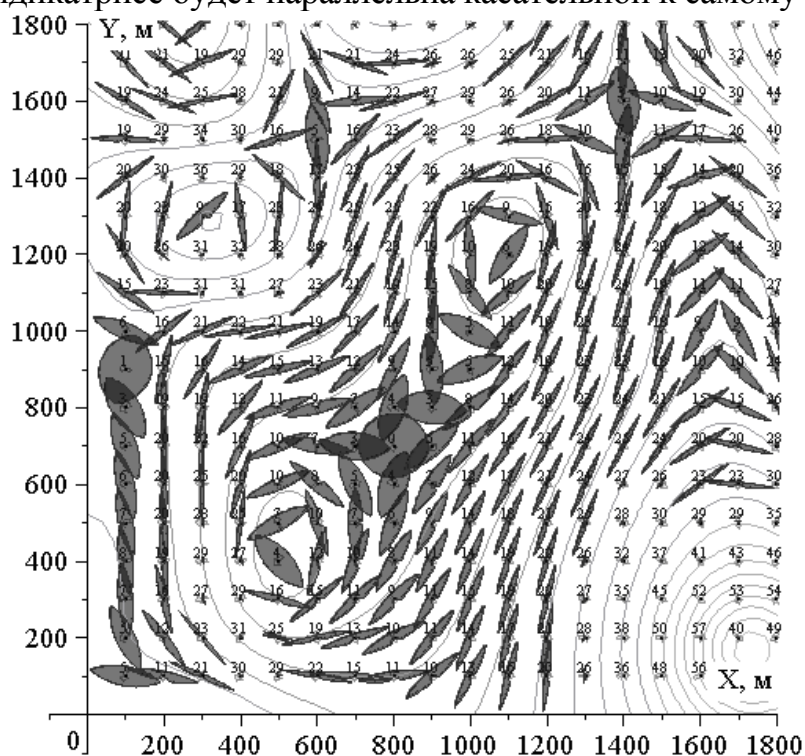


Рис. 4. Пример поля $V(x, y, \varphi, Z(x, y), w)$. Указана крутизна склона в градусах

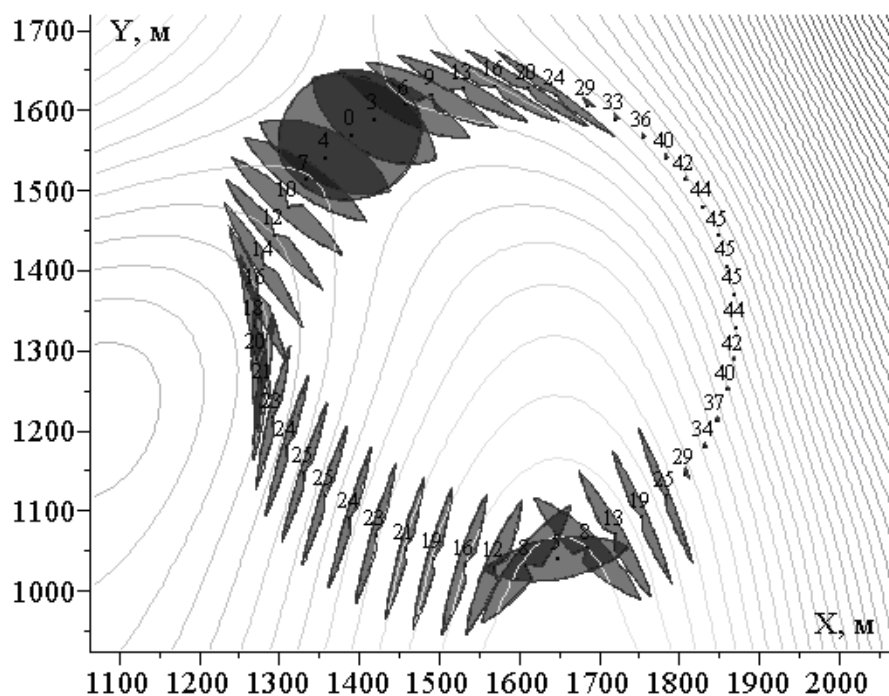


Рис. 5. Получение поля скорости $V(x, y, \varphi, Z(x, y), w)$ в точках фронта области транспортной достижимости

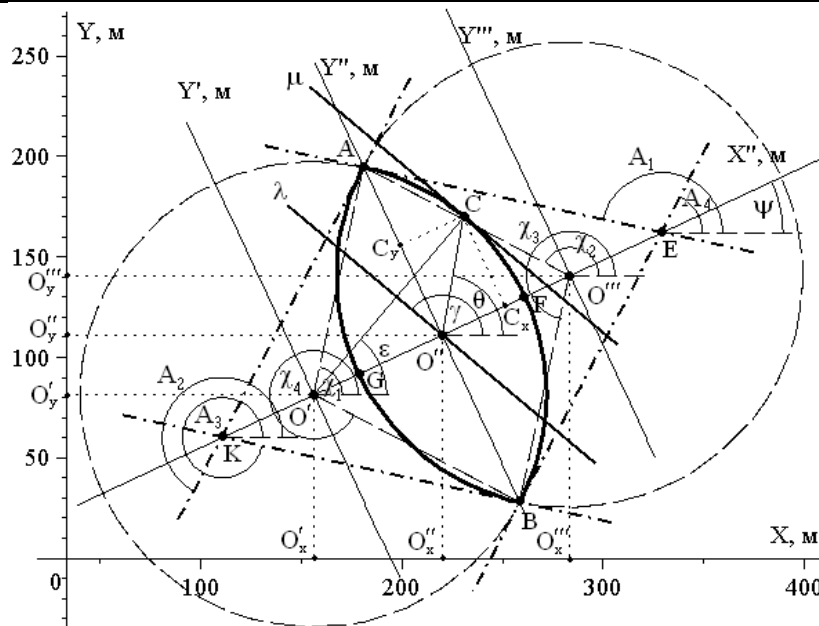


Рис. 6. Реализация принципа Гюйгенса

Осуществив [9] геометрические построения (рис. 6) данный угол найден в виде выражения (14), что позволяет осуществить построение контура на следующем временном шаге с помощью выражения (14). Данная процедура проиллюстрирована на рис. 7.

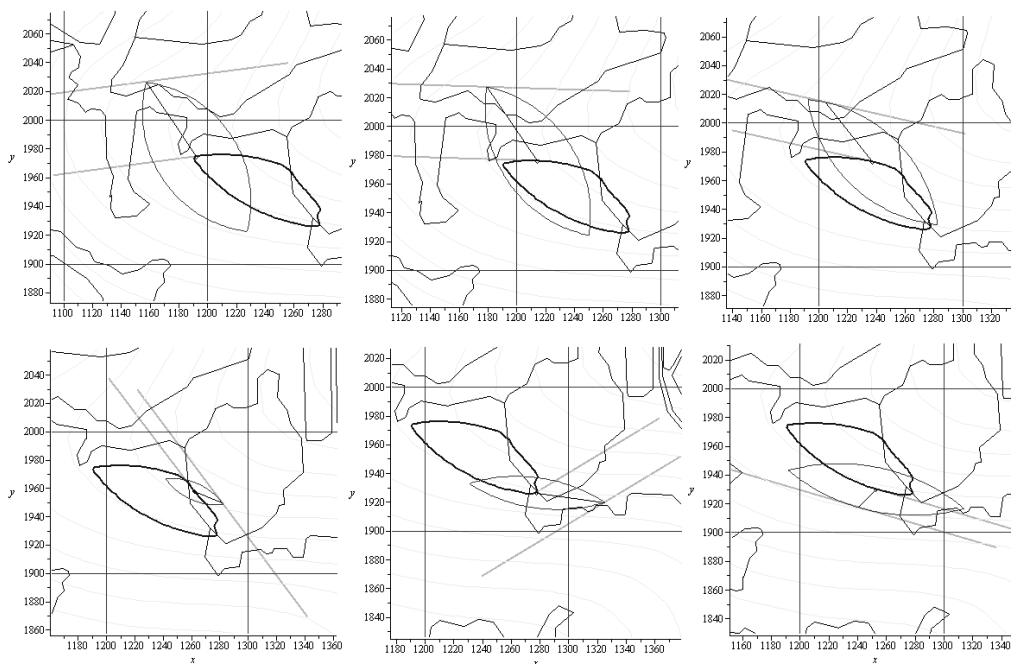


Рис. 7. Процедура построения нового контура области транспортной достижимости

$$L_{i+1}(m) = L_i(m) + V(\tilde{\varphi}_c(m)) \cdot \Delta t, \tag{14}$$

где Δt – временной шаг; $L_i(m)$ – параметрическое (параметр m) уравнение границы области в i -ый момент времени,

$$\tilde{\varphi}_C = \begin{cases} 3\pi/2 + \psi, & -\psi < \gamma \leq \tilde{A}_4 - \psi; \\ \arctg\left(\frac{-R_2 \cos(\gamma - \psi)}{R_2 \sin(\gamma - \psi) + R_2 - b_2}\right) + \psi, & \tilde{A}_4 - \psi < \gamma \leq \tilde{A}_1 - \psi; \\ \pi/2, & \tilde{A}_1 - \psi < \gamma \leq \tilde{A}_2 - \psi; \\ \arctg\left(\frac{-R_1 \cos(\gamma - \psi)}{R_1 \sin(\gamma - \psi) + R_1 - b_1}\right) + \pi + \psi, & \tilde{A}_2 - \psi < \gamma \leq \tilde{A}_3 - \psi; \\ 3\pi/2 + \psi, & \tilde{A}_3 - \psi < \gamma \leq 2\pi - \psi, \end{cases}$$

где $R_1 = \frac{b_1^2 + a^2}{2b_1^2}$, $R_2 = \frac{b_2^2 + a^2}{2b_2^2}$;

– радиусы окружностей;

$$\tilde{A}_1 = \pi + \arctg\left(\frac{b_2 - R_2}{a}\right); \tilde{A}_2 = \pi - \arctg\left(\frac{b_1 - R_1}{a}\right);$$

– углы между предельными касательными и осью $O''X''$;

$$\tilde{A}_3 = 2\pi + \arctg\left(\frac{b_1 - R_1}{a}\right); \tilde{A}_4 = -\arctg\left(\frac{b_2 - R_2}{a}\right);$$

ψ – азимут градиента рельефа;

γ – угол между касательной к границе области транспортной достижимости и осью OX .

Многократное использование данной процедуры позволяет получить множество изохрон – границ области транспортной достижимости (рис. 9) и решить оптимизационную задачу поиска наискорейшего маршрута прибытия из точки A в точку B

$$\ell^* = \arg \left(\min_{\ell \in L_{AB}(t)} (T(\ell)) \right). \quad (15)$$

Дальнейшие построения зависят от того, какой критерий оптимизации маршрута следует выбрать.

Критерий оптимизации, в свою очередь, определяется видом ЧС и целью, которая ставится при проведении эвакуации.

В случае ЧС, зона которой имеет четкие границы (лесной пожар, катастрофическое затопление), функцией цели является время эвакуации, а критерием оптимизации является минимум.

В случае ЧС, связанной с выбросом радиоактивного или химического вещества, критерием может являться минимум накопленной радиоактивной либо токсической дозы при движении вдоль маршрута эвакуации.

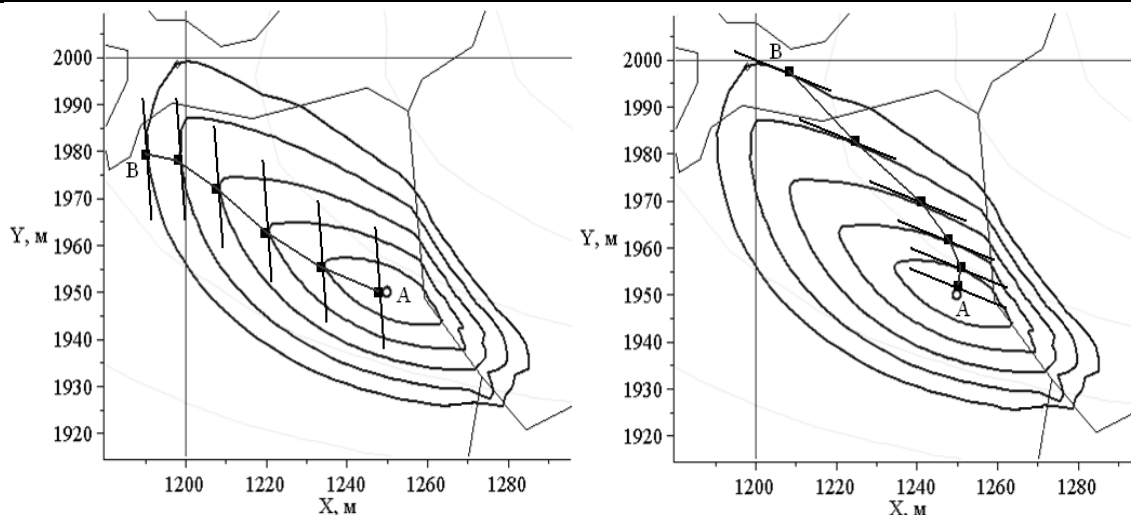


Рис. 8. Пример построения наискорейшего маршрута движения

Оценка эффективности эвакуации осуществляемой по оптимальным маршрутам (17)

$$K_T = T(\ell^*)/T(\ell_p), \quad (16)$$

где ℓ^* – оптимальный маршрут; ℓ_p – маршруты эвакуации, которые содержатся в существующих планах эвакуации или предоставлены экспертами.

Выводы. В работе приведен алгоритм нахождения оптимального маршрута экстренной эвакуации населения населенного пункта или крупного промышленного объекта по пересеченной местности в условиях разрушения или недоступности транспортной сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коба К.М. Моделі і методи розв'язання задач маршрутизації при ліквідації наслідків техногенних аварій / К.М. Коба // Дис. канд. техн. наук: 01.05.02. – Харків: ХНУРЕ. – 2005. – 160 с.
2. Глушкова В.В. Оптимизация процесса эвакуации населения в случае радиационной аварии / В.В. Глушкова, А.А. Седлецкий, Д.А. Седлецкий // Математические машины и системы. – 1998. - №1. – С. 89-94.
3. Косоруков О.А. Управляющая система проведения эвакуации из крупных городов на основе комплекса оптимизационных математических моделей / О.А. Косоруков, А.И. Овсяник, О.В. Виноградов // Вестник Казанского технологического университета. – Казань: КГТУ. – 2006. – №6. – С. 163-169.
4. Данилкин Ф.А. Трассировка маршрута движения по цифровым картам местности / Ф.А. Данилкин, Д.С. Наумов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Вып. 31. – Рязань: РГРТУ. – 2010. – № 1. – С.86-88.

5. Ушанов С.В. Оптимальная маршрутизация при управлении борьбой с лесными пожарами / С.В. Ушанов, О.В. Фадеенков // Хвойные бореальные зоны. - Красноярск: СибГТУ. – 2007. – №4-5. – С. 405-407.

6. Абрамов Ю.А. Оптимизация маршрута движения в условиях пересеченной местности / Ю.А. Абрамов, А.А. Тарасенко // Науковий вісник будівництва. Вип. 52.– Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2009. – С. 401-407.

7. Абрамов Ю.А. Моделирование пожаров, их обнаружения, локализации и тушения / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов, А.А. Тарасенко. – Харьков: НУГЗУ, 2011. – 972 с.

8. Беляєв В.Ю. Модель азимутальної швидкості руху автотранспорту, що здійснює евакуацію населення в умовах бездоріжжя / В.Ю. Беляєв, А.А. Тарасенко // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2012. – Вип. 16. – С. 16-28.

9. Беляєв В.Ю. Використання хвильового алгоритму для побудови маршрутів евакуації населеного пункту в умовах бездоріжжя / В.Ю. Беляєв, А.А. Тарасенко // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2013. – Вип. 17. – С. 18-30.

Получено редколлегией 12.10.2016

В.Ю. Беляєв, О.В. Стаховський, О.А. Тарасенко

Алгоритм знаходження оптимального маршруту екстреної евакуації населення

Запропоновано модель оптимального маршруту евакуації населення по пересіченій місцевості в відсутності транспортної мережі. Її реалізація в вигляді ітераційного алгоритму біжучої хвилі стосовно до кордону області транспортної досяжності дозволяє врахувати особливості реальної обстановки в зоні надзвичайної ситуації.

Ключові слова: евакуація населення, шляхи евакуації, моделі оптимального шляху евакуації.

V. Y. Belyaev, O. V. Stakhovsky, A. A. Tarasenko

The algorithm for finding the optimal route emergency evacuation

The model of optimal evacuation route for cross country in the absence of a transport network. Its implementation in the form of a traveling wave of the iterative algorithm is applied to the boundary of the attainability of transport allows to consider features of the real situation in the emergency area.

Keywords: evacuation, evacuation routes, the model of optimal escape route.