

*Беляев В.Ю., ад'юнкт, НУТЗУ,
Тарасенко А.А., канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НУТЗУ,
Туркин И.Б., д-р техн. наук, зав. каф., НАКУ «ХАИ»*

НАХОЖДЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ЭВАКУАЦИИ НАСЕЛЕНИЯ ПО СУЩЕСТВУЮЩЕЙ СЕТИ АВТОДОРОГ

Предложена процедура нахождения оптимального маршрута эвакуации населения по сети автодорог в случае угрозы поражения аварийно химически опасными веществами с возможностью ее реализации в рамках геоинформационных систем

Ключевые слова: эвакуация населения, маршруты эвакуации, токсодоза, аварийно химически опасные вещества

Постановка проблемы. На территории Украины размещены более 1,5 тыс. химически опасных объектов, деятельность которых связана с производством, использованием, хранением и транспортировкой аварийно химически опасных веществ, а в зонах их размещения проживает более 22,0 млн. человек.

Аварийно химически опасное вещество (АХОВ) — это вещество, применяемое в промышленности и сельском хозяйстве, при аварийном выбросе (разливе) которого может произойти заражение окружающей среды в поражающих живой организм концентрациях (токсодозах) [1].

Одним из основных путей уменьшения человеческих потерь в случае выброса АХОВ является эвакуация населения из зон возможного воздействия поражающих факторов [2-4]. В то же время, масштабность зоны поражения и ее динамический характер приводят к возможности нанесения ущерба здоровью людей непосредственно во время проведения эвакуации.

Одним из факторов, влияющих на эффективность проведения эвакуации, является выбор маршрутов эвакуации (которые являются составной частью плана эвакуации). При этом для быстроразвивающихся техногенных ЧС (химических, радиационных выбросов) заблаговременное определение пути эвакуации возможно лишь при дополнительных предположениях о метеорологических условиях и об объеме выброса [5]. Альтернативой плану эвакуации может стать оперативный план эвакуации населения,

который должен разрабатываться в режиме реального времени на основе текущей информации о ходе развития ЧС. Разработка такого плана возможна лишь при создании соответствующего программного обеспечения, в основе которого должен лежать прогноз развития динамической ЧС и математические модели нахождения оптимальных маршрутов. Наличие такого плана способно значительно повысить эффективность процесса эвакуации.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [6] рассмотрена модель зоны безопасности населенного пункта в случае распространения области поражения ЧС природного характера. Модель может оказаться полезной для получения критерия принятия решения о начале проведения эвакуации.

В работе [7] рассматривается оптимизация процесса эвакуации населения из зоны поражения после радиационной аварии. При этом область загрязнения и сеть автодорог являются неизменными за время проведения эвакуации, т.е. расчет происходит на основе ретроспективной, а не прогностической информации.

В работе [8] построена развернутая модель, обеспечивающая планирование эвакуации населения города, но не учитывающая динамику ЧС и возможных изменений в сети дорог.

В работе [9] формализовано задачу нахождения оптимальных маршрутов эвакуации населения в случае расширения области поражения ЧС природного и природно-техногенного характера. Обозначены этапы решения указанной задачи. При этом в работе не рассматривается скорость эвакуации и ее зависимость от ингаляционной токсодозы.

В литературе отсутствуют модели эвакуации населения при угрозе со стороны динамической области воздействия опасных факторов ЧС, поэтому актуальной является задача отыскания оптимальных маршрутов эвакуации населения по доступной сети дорог с динамической топологией.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является отыскание оптимальных (по критерию минимума токсодозы) маршрутов эвакуации населения по доступной сети дорог с динамической топологией.

Имеются два основных способа наземной эвакуации – пешая (индивидуальная и организованная в виде пешей колонны) и с помощью автотранспорта. Будем различать собственно эвакуацию, когда эвакуируемые лица перевозятся автосредством в качестве

пассажирам, і самоєвакуацію, яку здійснюють піші евакуйовані, а також водій автотранспорту.

В загальному випадку швидкість евакуації V залежить від власної швидкості евакуації v_T , визначеної способом евакуації (ТТХ автотранспорту в разі евакуації автотранспортом), типу поверхні, по якій здійснюється рух (грунтові або шосейні дороги, бездоріжжя, непрохідні перешкоди). При евакуації автотранспортом необхідно враховувати особливості вздовж маршруту L евакуації (хвилястість і пропускну здатність дороги). І для пішої, і для транспортної евакуації необхідно враховувати вплив рельєфу $Z(x, y)$ вздовж маршруту L руху. При пішій евакуації має місце зниження швидкості руху з часом t . Крім того, в разі самоєвакуації має місце залежність швидкості евакуації від інгаляційної токсодози C . Таким чином, швидкість евакуації

$$V = f(v_T, x, y, L, Z(x, y), t, C). \quad (1)$$

Інгаляційна токсодоза C в точці (x, y, z) за час експозиції T

$$C(x, y, z, T) = \int_0^T q(x, y, z, t) dt, \quad (2)$$

де $q(x, y, z, t)$ - динамічне поле концентрації АХОВ.

При русі вздовж відомого маршруту евакуації $L(x, y) = 0$, заданого явно в формі $y = Y(x)$, токсодоза дорівнює криволінійному інтегралу

$$C = \int_L q(x, y, Z(x, y), t) \frac{dl}{V} = \int_{x_1}^{x_2} q(x, Y(x), Z(x, Y(x)), t) \frac{\sqrt{1 + (Y'(x))^2}}{V} dx, \quad (3)$$

де x_1 і x_2 - абсциси точок початку і кінця руху.

В силу залежності (1) вираз (3) представляє собою інтегральне рівняння, рішення якого в загальному вигляді не представляється можливим. В зв'язі з цим, необхідно додатково ввести ряд модельних обмежень.

Будем рассматривать лишь эвакуацию населения автотранспортом, осуществляемую силами специальных подразделений (т.е. предполагается наличие защиты органов дыхания у водителя). Кроме того, сделаем допущение о независимости скорости движения автосредства от параметров маршрута и о равнинном рельефе в рассматриваемой области. В этом случае скорость эвакуации будет постоянной в пределах однородных участков. Данная постановка задачи включает в виде частного случая возможность рассмотрения эвакуации по существующей сети дорог.

При этом выражение (3) содержит время t , которое может быть выражено через x в виде

$$t(x) = \int_{x_1}^x \frac{\sqrt{1 + (Y'(x))^2}}{V(x, Y(x))} dx. \quad (4)$$

Рассмотрим процедуру нахождения ингаляционной токсодозы при эвакуации населения из зоны поражения, образованной мгновенным приповерхностным выбросом АХОВ и распространением первичного облака над равнинной местностью (данная ситуация может иметь место при разгерметизации железнодорожной цистерны, перевозящей АХОВ). В этом случае динамика концентрации АХОВ будет описываться выражением [10]

$$q(x, y, z, t) = \frac{m}{4(\pi t)^{3/2} \sqrt{a_x a_y a_z}} \times \exp \left[-\frac{(x - v_x t)^2}{4a_x t} - \frac{(y - v_y t)^2}{4a_y t} - \frac{(z - v_z t)^2}{4a_z t} \right], \quad (5)$$

где m – масса выброса; a_x, a_y, a_z – коэффициенты турбулентной диффузии; v_x, v_y, v_z – компоненты вектора \vec{v} скорости ветра в глобальной системе координат OXYZ. При этом под скоростью v_z подразумевается скорость осаждения (для тяжелого АХОВ).

Сориентируем ось OX' локальной системы координат вдоль скорости ветра. Тогда $v_{x'} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, а $v_{y'} = 0$. Полагая [11] $a_x = a_y = a_z = a$, для наземной концентрации (при $z = 0$) получим

$$q(x, y, t) = \frac{m}{4(\pi ta)^{3/2}} \exp \left[-\frac{(x - v_x t)^2 + y^2 + (v_z t)^2}{4at} \right]. \quad (6)$$

Задавая уровень концентрации $q = Q$ [12], из (6) можно найти явное уравнение $Y_Q(x)$ контура зоны поражения в виде

$$Y_Q^\pm = \pm \sqrt{-v_z^2 x^2 - 2 \ln \left(\frac{16Q^2 (\pi x a / v_x)^3}{m^2} \right) a v_x x} / v_x. \quad (7)$$

Осуществляя обратный переход в глобальную систему координат, получим параметрическое уравнение контура U зоны поражения в виде

$$U = \begin{cases} X = x_0 + x \cos \phi + Y_Q^\pm \sin \phi; \\ Y = y_0 - x \sin \phi + Y_Q^\pm \cos \phi, \end{cases} \quad (8)$$

где $\phi = \arctg(-v_y, v_x)$; (x_0, y_0) - координаты точки выброса.

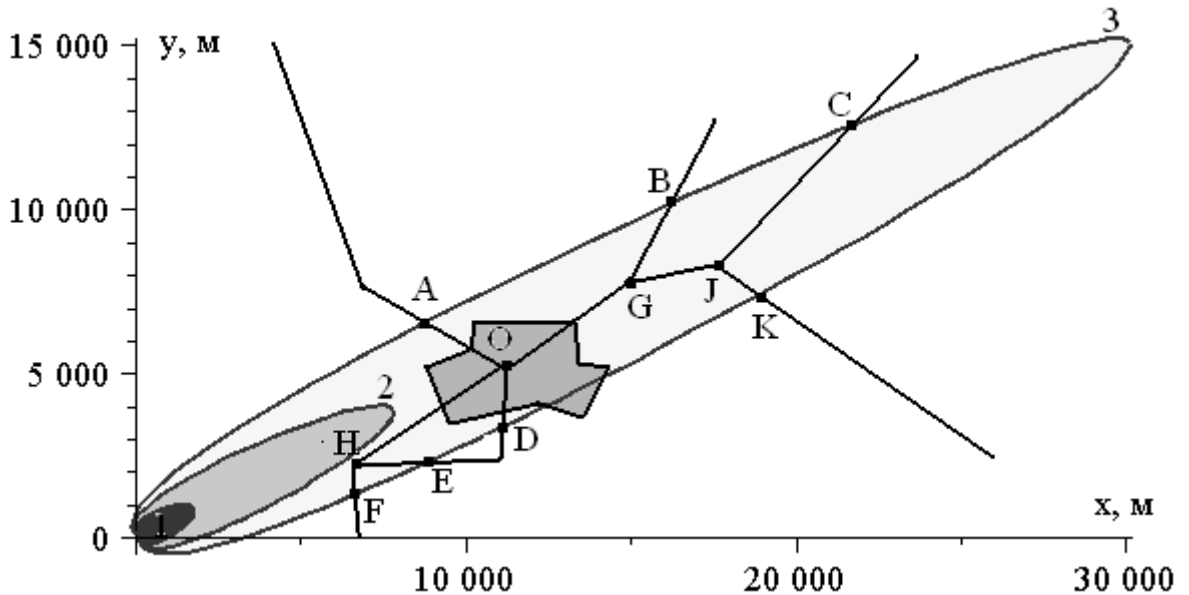


Рис. – Изображение зоны заражения и план эвакуируемого населенного пункта и сети автодорог

На рис. представлен расчет зоны поражения при разгерметизации 60-тонной ж/д цистерны с хлором при слабом юго-западном

Нахождение оптимального маршрута эвакуации населения по существующей сети автодорог

ветре $\vec{v}(0.2, 0.1)$. При этом полагалось, что $\alpha = 10 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $v_z = -0.01 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Цифрами на рисунке обозначены: 1- граница зоны летальной концентрации ($10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$); 2- граница зоны с возможным временем пребывания до 20 мин ($10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$); 3- граница зоны предельно допустимой концентрации ($10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$).

Дальнейшие действия предполагают выполнения следующих этапов:

1. Получение всех возможных маршрутов движения в виде остоного дерева графа [13].
2. Получение параметрических уравнений каждого из маршрутов согласно процедуре, описанной в [14].
3. Нахождение точек пересечения маршрутов и границы ПДК, заданной в виде (8) путем решения систем уравнений.
4. Получение явных уравнений для каждого из прямолинейных участков маршрута движения.
5. Вычисление ингаляционных токсодоз для каждого из маршрутов согласно (3), (4).
6. Отыскание среди множества маршрутов такого, ингаляционная токсодоза, получаемая при движении вдоль которого, является минимальной.
7. В случае непревышения минимальной токсодозой порогового значения, выбор данного маршрута в качестве оптимального для проведения эвакуации.

Достоинством предлагаемой процедуры является возможность ее реализации в рамках ГИС (при наличии электронных карт местности), что обеспечивает оперативность нахождения оптимального маршрута эвакуации.

Выводы. Анализ литературы продемонстрировал отсутствие моделей, которые позволяют найти оптимальные маршруты эвакуации в результате распространения области ЧС, поэтому проблема является актуальной и требует решения. Предложена процедура нахождения оптимального маршрута эвакуации населения по сети автодорог в случае угрозы поражения аварийно химически опасными веществами с возможностью ее реализации в рамках ГИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Комплексы средств индивидуальной защиты спасателей. Общие технические тре-

- бования. Обозначение: ГОСТ Р 22.9.05-95. - ГОСТ Р 22.9.05-95. [Дата введения 1996-07-01]. – М. : Государственный стандарт РФ, 1996.
2. Про єдину державну систему запобігання і реагування на НС техногенного та природного характеру. Постанова КМУ № 1198, 1998 р. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=1198-98-%EF>
 3. Концепція захисту населення і територій у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій. Указ Президента України, 1999 р. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.mns.gov.ua/txt/?doc=laws/laws/law284_99
 4. Про затвердження Положення про порядок проведення евакуації населення у разі загрози або виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру. Постанова КМ України N 1432, 2001 р. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/KP011432.html
 5. Защита населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. Учебное пособие / Под ред. Фалеева М.И. - Калуга: ГУП «Облиздат», 2001. – 259 с.
 6. Абрамов Ю.А. Математическая модель зоны уязвимости объекта «заботы» поражающими факторами чрезвычайной ситуации. / Ю.А. Абрамов, О.А. Тарасенко // Пожежна безпека. Вип. 14. – Львів: АБЖ, 2009. – С. 67-73.
 7. 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.
 8. 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.
 9. Беляев В.Ю. Пути повышения эффективности эвакуации населения при чрезвычайных ситуациях. / В.Ю. Беляев // Проблемы чрезвычайных ситуаций. Вып. 12. – Харьков: НУГЗУ, 2010. – С. 37-43.
 10. Басманов А.Е. Математическая модель диффузии паров опасных химических веществ в воздухе. / А.Е. Басманов, С.С. Го-

- валенков // Проблеми надзвичайних ситуацій. Вип.8. – Харків: УЦЗУ, 2008. — С. 29-39.
11. Замай С.С. Модели оценки и прогноза загрязнения атмосферы промышленными выбросами в информационно-аналитической системе природоохранных служб крупного города./ С.С. Замай, О.Э. Якубайлик: Учеб. пособие / Краснояр. гос. ун-т. Красноярск, 1998. – 109 с.
 12. Беспмятное Г.П. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе и воде. / Г.П. Беспмятное, К.К. Богущевская, А.В. Беспмятнова, Ю. А. Кротов, Л. А. Зеленская, В. Ф. Плехоткин, Г. Г, Смирнов // Изд. 2-е, пер. и доп. Л., «Химия», 1975.- 456 с.
 13. Алексеев В.Е. Графы. Модели вычислений. Структуры данных / В.Е. Алексеев, В.А. Таланов. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2005. - 307 с.
 14. Тарасенко О.А. Математичне моделювання вихідних параметрів областей надзвичайних ситуацій. / О.А. Тарасенко // Проблеми надзвичайних ситуацій. Вип. 8. – Харків: УЦЗУ, 2008. – С. 185-193.

Беляев В.Ю., Тарасенко О.А., Туркін І.Б.

Знаходження оптимальних маршрутів евакуації населення по існуючій мережі автошляхів

Запропоновано процедуру знаходження оптимального маршруту евакуації населення по мережі автодоріг у разі загрози ураження аварійно хімічно небезпечними речовинами з можливістю її реалізації в рамках ГІС.

Ключові слова: евакуація населення, маршрути евакуації, токсодоза, аварійно хімічно небезпечні речовини

Belyaev V.U., Tarasenko O.A., Turkin I.B.

Finding an optimal escape routes population on the existing road network

A procedure is proposed for finding the optimal route for evacuation of the road network in the event of defeat emergency chemically hazardous substances (poisoning substances) with the possibility of its implementation in a GIS

Key words: population evacuation, evacuation routes, toxic dose, emergency chemically hazardous substances