

Шаптала В.Г., д-р техн. наук, проф.,
Шаптала В.В., канд. техн. наук, доц.,
Юдина Т.Ю., инж.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭВАКУАЦИИ НАСЕЛЕНИЯ ИЗ ЗОНЫ ХИМИЧЕСКОГО ЗАРАЖЕНИЯ

shaptalavadim@yandex.ru

Разработан метод определения оптимальных маршрутов эвакуации населения из зоны химического заражения, основанный на минимизации среднедушевой токсодозы, получаемой населением в процессе эвакуации.

Ключевые слова: опасные химические объекты, поле концентраций, токсодоза, оптимальные маршруты эвакуации

Химические производства являются источниками опасности для населения и природной среды [1, 2].

В России работают свыше трех тысяч химических предприятий, располагающих значительными количествами аварийно химически опасных веществ (АХОВ), таких как аммиак, хлор и др. На отдельных производствах может находиться от нескольких сот до нескольких тысяч тонн АХОВ. Общий запас АХОВ на предприятиях достигает 700 тыс. тонн. Большие количества АХОВ перемещаются различными видами транспорта. Около 70% предприятий химической промышленности и почти все предприятия нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности сосредоточены в крупных городах с населением свыше 100 тыс. человек. Площадь территории России, на которой может возникнуть химическое заражение, составляет около 300 тыс. квадратных с населением около 59 млн. человек [3].

Существует ряд объективных причин, по которым аварийность химических производств в ближайшем будущем будет сохраняться и даже возрастать [4]. Это освоение сложных производств, с применением новых технологий, которые требуют высокой концентрации энергии и опасных веществ; высокий и всевозрастающий износ основных производственных фондов; снижение технологической и производственной дисциплины, уровня квалификации персонала; накопление отходов производства, опасных для окружающей среды [5]; угроза террористических нападений и другие.

В связи с этим в населенных пунктах, имеющих потенциально опасные химические объекты, заблаговременно планируются эвакуационные мероприятия, направленные на вывод (вывоз) населения в безопасные районы при угрозе или возникновении химических аварий. К основным задачам планирования эвакуации относятся назначение количества и дислокации сборных эвакуационных пунктов (СЭП), прием-

ных эвакуационных пунктов (ПЭП), распределение эвакуируемого населения по этим пунктам, а также выбор маршрутов эвакуации.

При планировании эвакуации учитывается, что персонал химически опасного объекта и население, проживающее в непосредственной близости от него, при возникновении химической аварии не выводятся из опасной зоны, а укрываются в убежищах, зданиях и сооружениях с проведением их герметизации и использованием средств индивидуальной защиты [5]. Эвакуация проводится лишь из зон возможного химического заражения, находящихся на расстояниях:

$$x \geq U_{\phi} \Delta t_{pз} \quad (1)$$

где $\Delta t_{pз}$ – время, необходимое для развертывания эвакуационных мероприятий, U_{ϕ} – скорость переноса переднего фронта зараженного воздуха, которая из-за атмосферной турбулентности может превышать скорость ветра на 40 ... 90 %.

При больших размерах зоны заражения существует опасность поражения населения в процессе проведения самой эвакуации. В связи с этим возникает необходимость выбора оптимальных маршрутов эвакуации, минимизирующих ущерб здоровью эвакуируемого населения.

Решение задачи оптимальной маршрутизации эвакуации включает в себя следующие этапы:

- выбор модели распространения АХОВ в приземном слое воздуха;
- выбор наиболее безопасных маршрутов эвакуации в зависимости от масштабов аварии, метеорологических условий и особенностей дорожной сети;
- определение оптимального распределения эвакуируемого населения по приемным эвакуационным пунктам;

Одним из наиболее опасных сценариев возникновения и развития химической аварии

является внезапное и полное разрушение технологической, складской или транспортной емкости, содержащей АХОВ. В этом случае часть опасного химического вещества практически мгновенно переходит в атмосферу (залповый выброс) и образует первичное облако зараженного воздуха. Пролившаяся на подстилающую поверхность или в поддон (обваловку) жидкая фаза АХОВ испаряется (непрерывный выброс) и образует вторичное облако. Фронт загрязненного обоими выбросами воздуха переносится ветром и размывается в результате атмосферной турбулентной диффузии. Поражающее воздействие АХОВ обусловлено не только его концентрацией C , но и продолжительностью Δt пребывания людей в зараженной зоне. Количественной мерой токсического воздействия АХОВ является токсодоза D , которая для фиксированной точки зоны химического заражения $P(x_p, y_p)$ равна:

$$D = \int_0^{\Delta t} C(x_p, y_p, t) dt \quad (2)$$

где Δt – продолжительность ликвидации химической аварии или снижения концентрации опасного химического вещества ниже порогового уровня. Токсодоза, получаемая людьми при эвакуации по маршруту M , определяется криволинейным интегралом первого рода:

$$D = \int_M C(x, y, t = S/v) dS/v, \quad (3)$$

где dS – дифференциал длины маршрута, v – средняя скорость движения по маршруту.

Пространственно-временное распределение концентрации АХОВ может быть оценено по действующим в настоящее время руководящим методикам. В частности согласно методике “Токс. Редакция 2.2.” [7] поле концентрации опасного вещества, возникающее в результате залпового выброса, описывается соотношениями:

$$C_1(x, y, z, t) = \frac{Q_1}{2V_1 + 15,75\sigma_x\sigma_y\sigma_z} G_1(x, y, z), \quad \text{мг/м}^3 \quad (4)$$

$$G_1 = \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2}\right) \exp\left(-\frac{(y)^2}{2\sigma_y^2}\right) \left(\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right)$$

Поле концентраций АХОВ, вызываемое непрерывным выбросом, имеет вид:

$$C_2(x, y, z) = \frac{q}{2q/\rho_2 + 6.28U\sigma_y\sigma_z} G_2(x, y, z), \quad \text{мг/м}^3 \quad (5)$$

$$G_2 = \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left(\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right)$$

В формулах (4, 5) Q_1 – массы опасного вещества, поступившего в атмосферу в результате залпового выброса; V_1 – начальный объем первичного облака; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – средние квадратические отклонения скорости ветра U , зависящие от расстояния от источника выброса x и шероховатости местности; q – интенсивность испарения АХОВ из зеркала пролива; ρ_2 – плотность испарившегося химического вещества, h – высота источника выброса. Соотношения для входящих в формулы (4, 5) параметров приведены в методике [7]. Результирующее поле концентраций АХОВ получается путем сложения полей залпового и непрерывного выбросов:

$$C(x, y, z) = C_1(x, y, z, t) + C_2(x, y, z) \quad (6)$$

Поле непрерывного выброса C_2 в отличие от C_1 не меняется со временем до полного испарения пролива. Именно это поле вносит основной вклад в токсодозу, получаемую людьми в зоне заражения, поэтому далее будем учитывать только его. Величины x, y, z

входящие в формулы (4 ... 6), задаются в локальной системе координат, в которой начало координат совпадает с источником выделения АХОВ, а ось $O'X'$ направлена по ветру.

Для территорий, на которых планируются эвакуационные мероприятия, используется стационарная система координат XOY .

Формулы преобразования локальных координат расчетных точек поля концентраций АХОВ в стационарные имеют вид:

$$\begin{aligned} x &= (x' - a) \cos \alpha + (y' - b) \sin \alpha, \\ y &= -(x' - a) \sin \alpha + (y' - b) \cos \alpha, \\ z &= z' \end{aligned} \quad (7)$$

где α – угол поворота оси OX относительно $O'X'$, a, b – координаты источника выброса АХОВ в стационарной системе координат (рис. 1).

Подставив эти выражения в формулы (4-6) получим соотношение для определения концентрации АХОВ в любой точке зоны заражения,

заданной ее координатами в стационарной системе координат $X'O'Y'$.

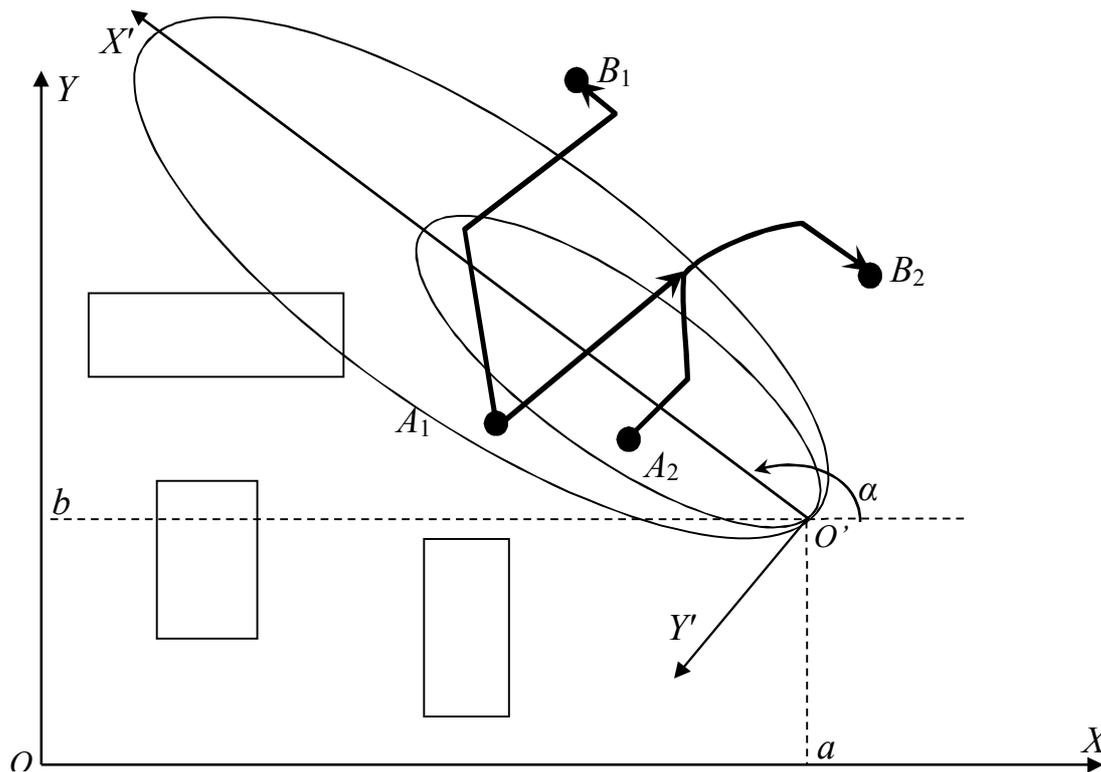


Рис. 1. Схема маршрутов экстренной эвакуации населения из зоны химического заражения

Инфраструктура эвакуации включает в себя m сборных эвакуационных пунктов (СЭП) A_i , в которых могут быть собраны a_i человек, $i = 1, 2, \dots, m$; и n приемных эвакуационных пунктов (ПЭП) B_j , которые могут принять b_j человек, $j = 1, 2, \dots, n$; дорожную сеть, связывающую множеством $N = m \cdot n$ маршрутов каждый СЭП с любым ПЭП. Маршруты по возможности должны прокладываться в направлении перпендикулярном направлению ветра (рис. 1). Общая вместимость всех приемных эвакуационных пунктов равна численности эвакуируемого населения K :

$$K = \sum_{j=1}^n b_j = \sum_{i=1}^m a_i \quad (8)$$

Маршрут эвакуации M_{ij} , соединяющий сборный эвакуационный пункт A_i с приемным эвакуационным пунктом B_j представляет собой P_{ij} участков улично-дорожной сети длиной l_{ijk} , $k = 1, 2, \dots, P_{ij}$, по которым эвакуация населения осуществляется со средней скоростью v_{ijk} . Будем аппроксимировать маршруты ломаными линиями, состоящими из прямоугольных отрезков. Тогда положение и длина k -го участка маршрута M_{ij} полностью определяются координатами его начала (x_1, y_1) и конца (x_2, y_2) (рис. 2):

$$l_k = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (9)$$

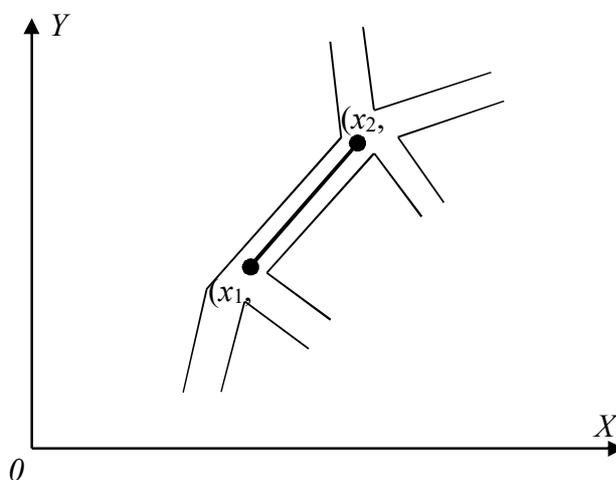


Рис. 2. Схема участка маршрута эвакуации

Разделим время перемещения по k -тому отрезку $t_k = l_k/v_k$ на N шагов $\Delta t = t_k/N$. Тогда изменения координат движущегося транспортного средства за один временной шаг равен:

$$\Delta x = \frac{x_2 - x_1}{l_k} v_k \Delta t \quad (10)$$

$$\Delta y = \frac{y_2 - y_1}{l_k} v_k \Delta t \quad (11)$$

Токсодоза, накопленная человеком при перемещении по этому отрезку, равна:

$$D_{ijk} = \sum_{n=0}^N C_2(x_1 + n\Delta x, y_1 + n\Delta y) \Delta t \quad (12)$$

Просуммировав токсодозы, накопленные на отдельных участках, найдем токсодозу, получаемую человеком на всем маршруте M_{ij} .

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^{P_{ij}} D_{ijk} \quad (13)$$

Пусть K_{ij} – количество людей, доставленных с i -го СЭП в j -й ПЭП маршрутом M_{ij} . Тогда токсодоза, накопленная всеми эвакуируемыми по этому маршруту, составляет $D_{ij}K_{ij}$, а средняя токсодоза, полученная человеком в ходе эвакуации равна:

$$D = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D_{ij}K_{ij} \quad (14)$$

где K – численность всего эвакуируемого населения.

Оптимальным следует считать такое распределение эвакуируемого населения по марш-

рутам, при котором среднечеловечья токсодоза будет минимальной. Отсюда следует, что задача маршрутизации эвакуации сводится к закрытой транспортной задаче [8]:

$$D \rightarrow \min \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^n K_{ij} = a_i, \quad i=1,2,\dots,m \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^m K_{ij} = b_j, \quad j=1,2,\dots,n \quad (17)$$

Смысл этих ограничений состоит в том, что в результате эвакуации все находящиеся в СЭП люди будут выведены, а все ПЭП будут заполнены.

Расчеты показывают, что для сведения к минимуму среднечеловечья токсодозы, получаемой в процессе эвакуации, людей находящихся в каждом сборном эвакуационном пункте, возможно, придется распределять по различным маршрутам эвакуации.

Оптимизационная задача решалась в два этапа:

- Для каждой комбинации сборных и приемных пунктов определялся оптимальный маршрут с использованием алгоритма Дейкстры. В качестве весов дуг графа дорожной сети принималась накопленная токсодоза.
- Для найденных маршрутов решалась транспортная задача.

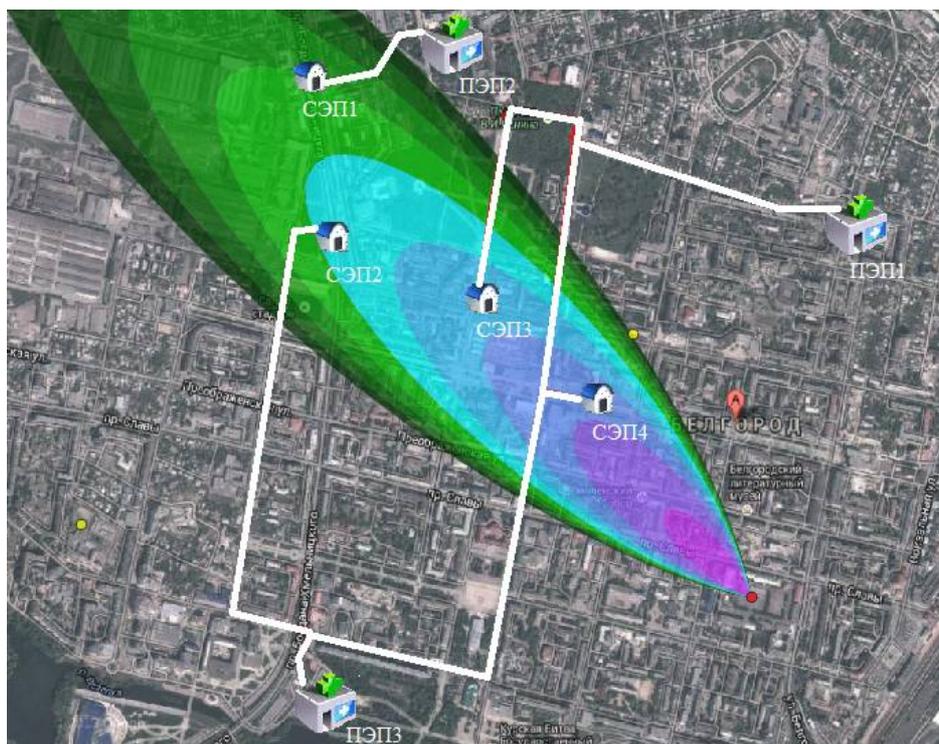


Рис. 3. Результаты расчетов оптимальных маршрутов эвакуации при возможной аварии на химически опасном объекте

На основе приведенного выше алгоритма было разработано приложение, позволяющее при планировании эвакуационных мероприятий заблаговременно рассчитать оптимальные маршруты эвакуации для всех основных типов метеорологических условий.

Приложение было реализовано на языке Python с использованием фреймворка QT, набора библиотек QGIS, а также систем геоутилитаров pgRouting и библиотеки SciPy. При подготовке дорожной сети использовались ресурсы проекта OpenStreetMap.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маршал В. Основные опасности химических производств. М.: Мир, 1989. 672 с.
2. Лопанов А.Н., Климова Е.В. Мониторинг и экспертиза безопасности жизнедеятельности. Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. 201 с.
3. Владимиров В.А. Измалков В.И., Измалков А.В. Радиационная и химическая безопасность населения. М.: Деловой экспресс, 2005. 504 с.
4. Шаптала В.Г., Шаптала В.В., Радоуцкий В.Ю. Применение нейросетевых технологий для прогнозирования чрезвычайных ситуаций // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. №2. С. 152-154
5. Свергузова С.В. Проблема накопления и переработки отходов: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2005. 114 с.
6. Руководство по эвакуации населения в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера. М.: Изд-во ВНИИ ГОЧС, 1996. 79 с.
7. Методика оценки последствий химических аварий (Методика "Токси-2.2". Сборник документов. Серия 27. Вып. 2: М.: ГУП НТЦ "Промышленная безопасность", 2002. 208 с.
8. Коба К.М. Модели и методы решения задач маршрутизации при ликвидации последствий техногенных аварий: автореф. ... канд. техн. наук. Харьков, 2005. 21 с.

Shaptala V.G., Shaptala V.V., Yudin T.Y.

BY ROUTING IN AT EVACUATION POPULATION FROM THE ZONE OF CHEMICAL CONTAMINATION

A method for determining optimal routes evacuation from the area of chemical contamination based on the minimization of the average per toksodozy to the population in the process of evacuation.

Key words: *hazardous chemical facilities, the concentration field, toksodoza optimal evacuation routes.*