

УДК 614.8

Светличная С.Д., канд. техн. наук, доц., НУГЗУ

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ ЭВАКУАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВТОРИЧНОГО ОБЛАКА ТОКСИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

(представлено д-ром техн. наук Куценко Л.Н.)

По критерию минимума полученной токсодозы вдоль пути следования определено оптимальное направление эвакуации при условии прямолинейного движения

Ключевые слова: токсическое вещество, вторичное облако, концентрация вещества в воздухе

Постановка проблемы. При чрезвычайных ситуациях, связанных с выбросом опасного химического вещества в атмосферу, выделяют первичное и вторичное облако. Вторичное облако характерно для разлившихся медленно испаряющихся жидкостей либо при утечках газообразного вещества из технологического оборудования, продолжающихся в течение длительного периода времени. Основным способом защиты технического персонала и населения при таких авариях является эвакуация. При этом возникает задача о выборе маршрута эвакуации.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [1, 2] рассмотрена задача эвакуации населения по существующей сети автомобильных дорог, но в качестве критерия выступает минимальное время достижения заданной точки. В работе [3] решена задача выбора оптимального направления эвакуации при накрытии маршрута движения первичным облаком токсического вещества, возникающим при мгновенном разрушении емкости с газообразным токсическим веществом или проливом быстроиспаряющейся токсической жидкости. Под оптимальным понимается такое направление, вдоль которого максимальная концентрация токсического вещества будет наименьшей. Но такой критерий не применим к установившемуся полю концентраций, т.к. функция распределения концентрации у поверхности земли имеет один экстремум.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является определение такого направления эвакуации из области, накрытой

вторичним облаком токсического вещества, вдоль которого полученная токсодоза будет минимальной.

Расположим систему координат таким образом, чтобы ее начало совпадало с точкой выброса токсического вещества, а ось OX была направлена вдоль направления ветра. Тогда концентрация вещества в точке (x, y, z) в момент времени t будет описываться выражением

$$q(x, y, z, t) = \frac{E}{8\pi^{3/2} \sqrt{a_x a_y a_z}} \cdot \int_0^t \frac{1}{(t-\tau)^{3/2}} \exp \left[-\frac{(x-v_g(t-\tau))^2}{4a_x(t-\tau)} - \frac{y^2}{4a_y(t-\tau)} \right] \times \\ \times \left\{ \exp \left[-\frac{(z-z_0)^2}{4a_z(t-\tau)} \right] + \exp \left[-\frac{(z-z_0)^2}{4a_z(t-\tau)} \right] \right\} d\tau,$$

где E – интенсивность истечения вещества из источника выброса; a_x, a_y, a_z – коэффициенты турбулентной диффузии вдоль осей OX, OY, OZ соответственно; v_g – скорость ветра; z_0 – высота, на которой происходит выброс вещества. Предполагая, что выброс происходит вблизи поверхности земли ($z_0 \approx 0$) и рассматривая концентрации вещества в воздухе также при $z \approx 0$, получим

$$q(x, y, t) = \frac{E}{4\pi^{3/2} \sqrt{a_x a_y a_z}} \cdot \int_0^t \frac{1}{(t-\tau)^{3/2}} \exp \left[-\frac{(x-v_g(t-\tau))^2}{4a_x(t-\tau)} - \frac{y^2}{4a_y(t-\tau)} \right] d\tau = \\ = \frac{E}{4\pi^{3/2} \sqrt{a_x a_y a_z}} \cdot \int_0^t \frac{1}{\tau^{3/2}} \exp \left[-\frac{(x-v_g\tau)^2}{4a_x\tau} - \frac{y^2}{4a_y\tau} \right] d\tau. \quad (1)$$

Переходя к пределу при $t \rightarrow \infty$, получим установившееся распределение концентраций вблизи поверхности земли

$$q(x, y) = \frac{E}{4\pi^{3/2} \sqrt{a_x a_y a_z}} \cdot \int_0^\infty \frac{1}{\tau^{3/2}} \exp \left[-\frac{(x-v_g\tau)^2}{4a_x\tau} - \frac{y^2}{4a_y\tau} \right] d\tau. \quad (2)$$

Сравнение интегралов с конечным пределом интегрирования (1) и бесконечным (2) показывает, что установившееся распределение концентраций в окрестности точки выброса (десятки метров) наступает через несколько минут. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать именно это распределение. Интегрирование выражения (2) с помощью пакета Maple дает

$$q(x, y) = \frac{E}{2\pi\sqrt{a_z}\sqrt{a_yx^2 + a_xy^2}} \exp\left[\frac{xv_e - v_e\sqrt{x^2 + y^2}a_x/a_y}{2a_x}\right]. \quad (3)$$

Полагая коэффициенты турбулентной диффузии $a_x = a_y = a_z = a$, окончательно получим установившееся распределение концентраций в виде

$$q(x, y) = \frac{E}{2\pi a\sqrt{x^2 + y^2}} \exp\left[-\frac{v_e(\sqrt{x^2 + y^2} - x)}{2a}\right]. \quad (4)$$

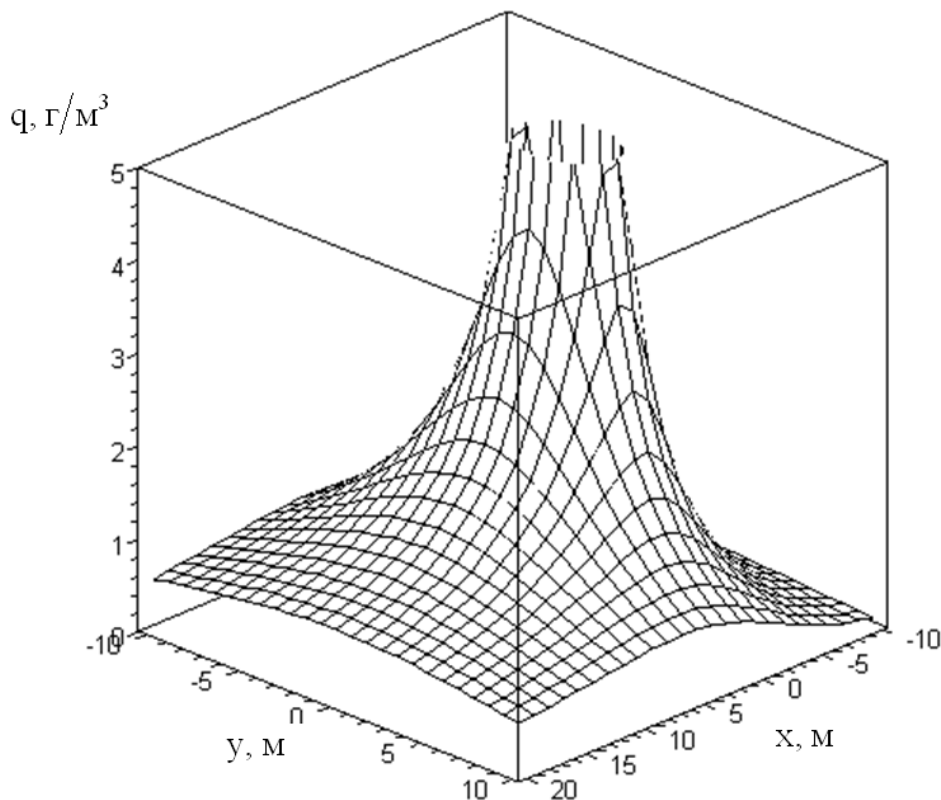


Рис. 1 – Установившееся распределение концентраций для источника с единичной мощностью ($E = 1$ кг/с)

Поскольку распределение концентраций (4) не зависит от времени и описывается функцией, имеющей максимум в точке выброса токсического вещества (рис. 1), то выбор направления эвакуации по критерию минимума максимального значения концентрации, как это было сделано для первичного облака [3], оказывается невозможным.

В любом направлении, обеспечивающем удаление от начала координат, концентрация токсического вещества будет монотонно убывать. Поэтому целесообразно выбрать направление эвакуации так, чтобы минимизировать полученную токсодозу

$$Ct = \int_0^{\infty} q(x(t), y(t)) dt \rightarrow \min.$$

Пусть эвакуация происходит из начальной точки (x_0, y_0) с постоянной скоростью v и в постоянном направлении, определяемым углом α между вектором скорости движения и осью OX . Тогда движение будет описываться уравнениями

$$\begin{cases} x = x_0 + vt \cos \alpha \\ y = y_0 + vt \sin \alpha, \end{cases}$$

а полученная токсодоза

$$Ct = \frac{E}{2\pi a} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{(x_0 + vt \cos \alpha)^2 + (y_0 + vt \sin \alpha)^2}} \times \\ \times \exp \left[-\frac{v_0 \left(\sqrt{(x_0 + vt \cos \alpha)^2 + (y_0 + vt \sin \alpha)^2} - x_0 - vt \cos \alpha \right)}{2a} \right] dt. \quad (5)$$

Выполняя замену переменной интегрирования $\tau = vt$, получим

$$Ct = \frac{E}{2\pi av} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{(x_0 + \tau \cos \alpha)^2 + (y_0 + \tau \sin \alpha)^2}} \times$$

$$\times \exp \left[- \frac{v_g \left(\sqrt{(x_0 + \tau \cos \alpha)^2 + (y_0 + \tau \sin \alpha)^2} - x_0 - \tau \cos \alpha \right)}{2a} \right] d\tau \rightarrow \min_{\alpha} .(6)$$

Анализ выражения (6) показывает, что направление эвакуации будет определяться координатами начальной точки (x_0, y_0) , из которой происходит эвакуация, и состоянием атмосферы – скоростью ветра v_g и коэффициентом турбулентной диффузии a . Задача минимизации (6) может быть решена численно, например, методом Ньютона.

В качестве примера на рис. 2 показаны направления эвакуации для параметров атмосферы $v_g = 3 \text{ м/с}$ и $a = 10 \text{ м}^2/\text{с}$.

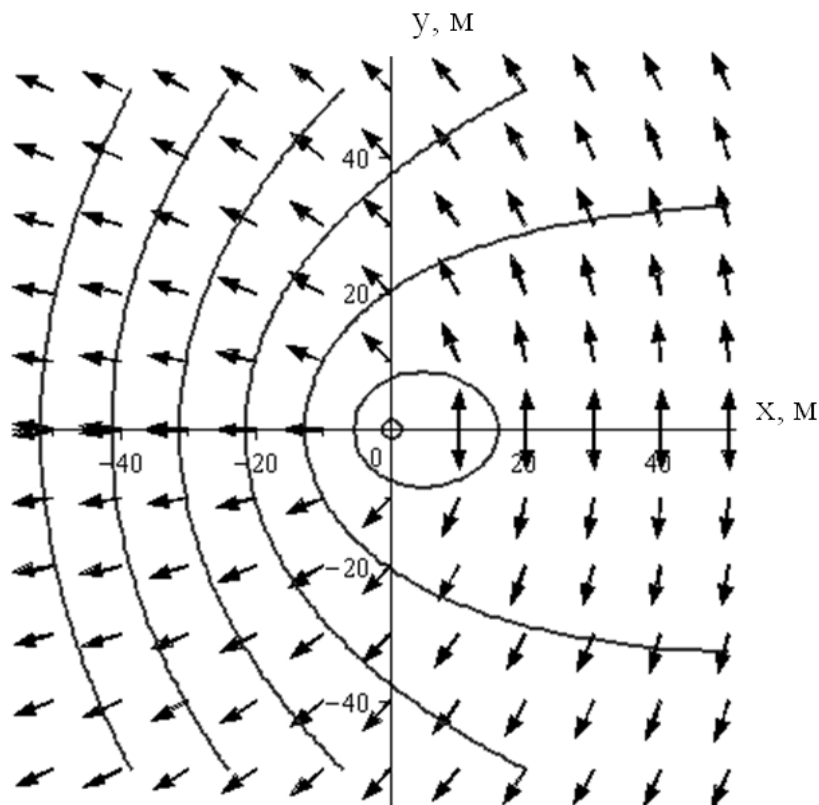


Рис. 2 – Линии уровня установившегося распределения концентраций (3) и направления эвакуации

Выводы. По критерию минимума полученной токсодозы вдоль пути следования определены оптимальные направления эвакуации при прямолинейном движении в условиях накрытия маршрута вторичным облаком токсического вещества. Показано,

что скорость эвакуации не влияет на выбор оптимального направления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев В.Ю. Шляхи підвищення ефективності наземної евакуації населення при надзвичайних ситуаціях / В.Ю. Беляев // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Харків: НУЦЗУ, 2010. – Вип. 12. – С. 37-43.
2. Беляев В.Ю. Нахождение оптимального маршрута эвакуации населения по существующей сети автодорог / В.Ю. Беляев, А.А. Тарасенко // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Харків: НУЦЗУ, 2011. – Вип. 13. – С. 39-46.
3. Светличная С.Д. Выбор оптимального направления эвакуации при накрытии маршрута движения первичным облаком токсического вещества / С.Д. Светличная // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Харків: НУЦЗУ, 2012. – Вип. 15. – С. 154-159.

Світлична С.Д.

Вибір оптимального напрямку евакуації в умовах вторинної хмари токсичної речовини

За критерієм мінімуму токсодози, отриманої вздовж шляху слідування визначено оптимальний напрямок евакуації за умови прямолінійного руху

Ключові слова: токсична речовина, вторинна хмара, концентрація токсичної речовини в повітрі

Svetlichna S.D.

Selection of optimal direction for evacuation route under secondary cloud toxic substances

The optimal direction of evacuation is determined by the criterion of minimum of toxic dose along the route

Key words: toxic substance, second cloud, concentration of toxic substance in the air