

УДК 614.8

*Басманов А.Е., д-р техн. наук, гл. науч. сотр., УГЗУ,
Говаленков С.С., науч. сотр., УГЗУ*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ ЗОН ПРИ ЛИКВИДАЦИИ АВАРИИ, СВЯЗАННОЙ С ВЫБРОСОМ ОПАСНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

(представлено д-ром техн. наук Лариным А.Н.)

Построена стохастическая математическая модель определения концентрации опасных химических веществ в воздухе после ликвидации источника выброса и позволяющая определять границы зон, в которых эта концентрация превышает допустимую

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, опасные химические вещества.

Постановка проблемы. При чрезвычайных ситуациях (ЧС) на предприятиях и объектах, использующих опасные химические вещества (ОХВ), для оценки превышения их концентрации в воздухе допустимого значения, определяющего степень поражения людей в результате токсического воздействия, наибольшее распространение получили численные и вероятностные методы. Такие методы используют модели, имеющие ряд недостатков, обусловленных тем, что коэффициенты моделей являются усредненными, поэтому определение вероятности поражения затруднительно. Поэтому необходимо иметь информацию о предполагаемом превышении допустимых значений основных параметров, определяющих критическую концентрацию ОХВ, а следовательно – границы безопасных зон для людей.

Анализ последних исследований и публикаций. Как отмечается в [1,2], использование вероятностных моделей для анализа возможного поражения людей – одно из наиболее широко используемых направлений при моделировании ЧС, связанных с выбросом ОХВ. Учитывая недостатки используемых в методиках методов, в частности, учета среднего значения направления и скорости ветра при прогнозировании развития ЧС и ее последствий, в [3] предложена математическая модель диффузии паров ОХВ в воздухе, позволяющая оценить вероятность превышения концентрацией выброшенного вещества некоторого критического значения. В [4] проведена оценка вероятности достижения концентра-

цией вещества критических значений и вероятность превышения величины токсической дозы критического значения. Полученные результаты позволяют определить зоны безопасности для личного состава подразделений МЧС и населения в условиях чрезвычайной ситуации, связанной с утечкой ОХВ в атмосферу.

Постановка задачи и ее решение. Для прогнозирования последствий аварий, связанных с утечкой газообразных веществ, и принятия решений по эвакуации населения, важно оценить вероятность достижения концентрацией выброшенного вещества опасного значения и время, в течение которого эта концентрация будет сохраняться в данной точке пространства.

Полученные в [3,4] параметры случайного процесса $\mu(x, y, z, t)$ позволяют оценить вероятность достижения случайным процессом заданного значения в конкретный момент времени t , но не дают возможности найти вероятность такого события на интервале времени от момента аварии и до текущего момента.

После ликвидации источника выброса ОХВ по-прежнему сохраняется опасность для личного состава подразделений, участвующих в ликвидации ЧС, технического персонала предприятия, населения. Это обуславливает необходимость оценки распространения ОХВ в воздухе до его полного рассеивания, т.е. снижения концентрации меньше критической.

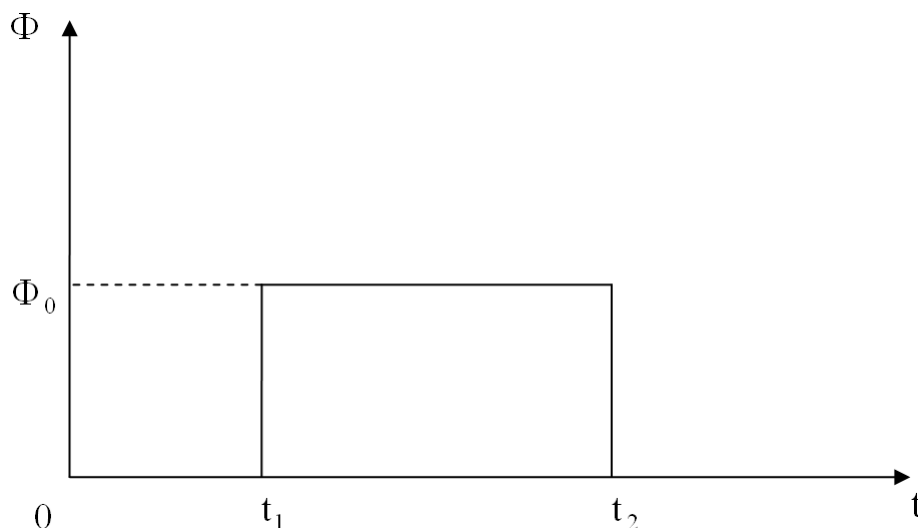


Рис. 1 - Объемная плотность $\Phi(t)$ источника диффундирующего вещества, действующего в интервале времени (t_1, t_2)

С математической точки зрения ситуации с ликвидированным источником истечения ОХВ соответствует П-образная функция [5] объемной плотности источника $\Phi(t)$ (рис. 1), где t_1 , t_2 – моменты начала и прекращения действия источника ОХВ.

Начиная отсчет времени от момента аварии, запишем функцию источника в виде

$$\Phi(t) = (1 - 1(t - t_0))\Phi_0,$$

где t_0 – момент ликвидации аварии; $1(t)$ – функция Хевисайда

$$1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t \geq 0. \end{cases}$$

Считая размеры отверстия, через которое происходит утечка ОХВ, бесконечно малыми (по сравнению с зоной поражения), запишем объемную плотность источника ОХВ в виде

$$\Phi(x, y, z, t) = E\delta(x - x_0)\delta(y - y_0)\delta(z - z_0)(1 - 1(t - t_0)),$$

где E – интенсивность источника ОХВ, кг/с; (x_0, y_0, z_0) – координаты источника ОХВ.

Совмещая начало координат с источником ОХВ, получим уравнение распространения ОХВ в воздухе от точечного источника мощностью E , находящегося в точке $(0, 0, z_0)$ и действующего на протяжении интервала времени $(0, t_0)$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} = & a \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + a \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + a_z \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} - v_x \frac{\partial q}{\partial x} - v_y \frac{\partial q}{\partial y} - v_z \frac{\partial q}{\partial z} + \\ & + E\delta(x)\delta(y)\delta(z - z_0)(1 - 1(t - t_0)). \end{aligned} \quad (1)$$

с начальным и краевым условиями соответственно

$$q(x, y, z, 0) = 0, \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial q}{\partial z} \right|_{z=0} = 0. \quad (3)$$

Делая замену

$$\begin{cases} x' = x - \int_0^t v_x(t) dt, \\ y' = y - \int_0^t v_y(t) dt, \\ z' = z - v_z t \end{cases}$$

и переходя к функции

$$u(x', y', z', t) = q\left(x' + \int_0^t v_x(t) dt, y' + \int_0^t v_y(t) dt, z' + v_z t, t\right),$$

получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= a \frac{\partial^2 u}{\partial x'^2} + a \frac{\partial^2 u}{\partial y'^2} + a_z \frac{\partial^2 u}{\partial z'^2} + \\ &+ E \delta\left(x' + \int_0^t v_x(t) dt\right) \delta\left(y' + \int_0^t v_y(t) dt\right) \delta(z' + v_z t - z_0) (1 - 1(t - t_0)). \end{aligned} \quad (4)$$

Решение такого уравнения может быть записано в виде [6]

$$u(x', y', z') = \int_0^t \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \Phi(\xi, \eta, \zeta, \tau) \cdot G(x', y', z', \xi, \eta, \zeta, t - \tau) d\xi d\eta d\zeta d\tau, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi(\xi, \eta, \zeta, \tau) &= E \delta\left(\xi + \int_0^\tau v_x(t) dt\right) \cdot \delta\left(\eta + \int_0^\tau v_y(t) dt\right) \times \\ &\times \delta\left(\zeta + v_z \tau - z_0\right) (1 - 1(\tau - t_0)) \end{aligned}$$

$G(x, y, z, \xi, \eta, \zeta, t)$ – функція Грина вида

$$G(x, y, z, \xi, \eta, \zeta, t) = \frac{1}{8(\pi t)^{3/2} a \sqrt{a_z}} \exp \left[-\frac{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}{4at} \right] \times \\ \times \left\{ \exp \left[-\frac{(z - \zeta)^2}{4a_z t} \right] + \exp \left[-\frac{(z + \zeta)^2}{4a_z t} \right] \right\}.$$

С учетом свойства δ -функции $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(x - x_0) dx = f(x_0)$, после интегрирования в (5) по $d\xi$, $d\eta$, $d\zeta$ получим

$$u(x', y', z, t) = \int_0^t \frac{E(1 - 1(\tau - t_0))}{8(\pi(t - \tau))^{3/2} a \sqrt{a_z}} \times \\ \times \exp \left[-\frac{\left(x' + \int_0^\tau v_x(t) dt \right)^2 + \left(y + \int_0^\tau v_y(t) dt \right)^2}{4a(t - \tau)} \right] \times \\ \times \left\{ \exp \left[-\frac{(z' + v_z \tau - z_0)^2}{4a_z(t - \tau)} \right] + \exp \left[-\frac{(z' + v_z \tau + z_0)^2}{4a_z(t - \tau)} \right] \right\} d\tau.$$

Возвращаясь к исходной функции $q(x, y, z, t)$ и переменным x, y , получим концентрацию паров в воздухе

$$q(x, y, z, t) = \frac{E}{8\pi^{3/2} a \sqrt{a_z}} \cdot \int_0^t \frac{1 - 1(\tau - t_0)}{(t - \tau)^{3/2}} \times \\ \times \exp \left[-\frac{\left(x - \int_\tau^t v_x(s) ds \right)^2 + \left(y - \int_\tau^t v_y(s) ds \right)^2}{4a(t - \tau)} \right] \times$$

$$\times \left\{ \exp \left[-\frac{(z - v_z(t - \tau) - z_0)^2}{4a_z(t - \tau)} \right] + \exp \left[-\frac{(z - v_z(t - \tau) + z_0)^2}{4a_z(t - \tau)} \right] \right\} d\tau. \quad (6)$$

Таким образом, для ветра, описываемого вектором скорости со случайными компонентами $\vec{v} = (\xi(t), \eta(t))$ концентрация ОХВ в воздухе будет описываться случайным процессом $\mu(x, y, z, t)$

$$\begin{aligned} \mu(x, y, z, t) = & \frac{E}{8\pi^{3/2}a\sqrt{a_z}} \cdot \int_0^t \frac{1 - 1(\tau - t_0)}{(t - \tau)^{3/2}} \times \\ & \times \exp \left[-\frac{\left(x - \int_{\tau}^t \xi(s) ds \right)^2 + \left(y - \int_{\tau}^t \eta(s) ds \right)^2}{4a(t - \tau)} \right] \times \\ & \times \left\{ \exp \left[-\frac{(z - v_z(t - \tau) - z_0)^2}{4a_z(t - \tau)} \right] + \exp \left[-\frac{(z - v_z(t - \tau) + z_0)^2}{4a_z(t - \tau)} \right] \right\} d\tau. \quad (7) \end{aligned}$$

Анализ соотношений (6) и (7) показывает, что при $\tau > t_0$ подынтегральные функции этих выражений обращаются в 0. Это означает, что на интервале времени $(0, t_0)$, т.е. во время действия источника, распределение концентрации ОХВ совпадает со случаем постоянно действующего источника. После того, как авария ликвидирована ($t > t_0$), концентрация ОХВ в воздухе описывается выражениями аналогичными (6), (7), но интегралы имеют постоянный верхний предел, равный t_0 .

В качестве примера рассмотрим утечку оксида азота (NO_2) с интенсивностью $E = 50$ г/с, происходящую на высоте $z_0 = 3$ м. Ветер со средней скоростью $v_x = 1$ м/с направлен вдоль оси OX , вертикальная составляющая $v = 0,01$ м/с, дисперсии компонент скорости ветра $\sigma_\xi^2 = 0,2$ м²/с², $\sigma_\eta^2 = 0,1$ м²/с². Пусть источник ОХВ действует в течение $t_0 = 20$ мин. На рис. 2 представлена динамика изменения области, в которой математическое ожидание концентрации оксида азота в воздухе на высоте $z = 2$ м превосходит ПДК,

Определение безопасных зон при ликвидации аварии, связанной с выбросом опасных химических веществ

соответствующая периоду после ликвидации источника ОХВ ($t > t_0$).

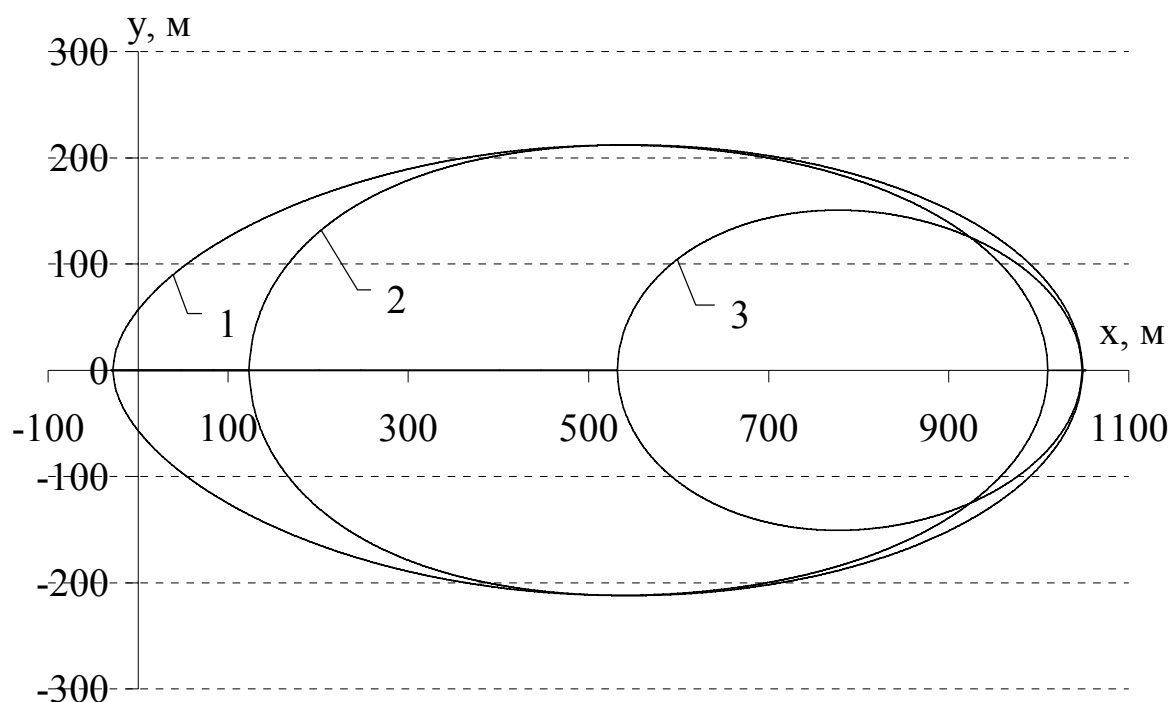


Рис. 2 - Границы областей, в которых концентрация оксида азота превышает ПДК, для различных моментов времени: 1 – $t = 20$ мин.; 2 – $t = 25$ мин.; 3 – $t = 30$ мин.

Отметим, что если продолжительность выброса t_0 устремить к нулю, одновременно увеличивая интенсивность выброса, так, чтобы сохранялось общее количество выброшенного вещества ($E \cdot t_0 = \text{const}$), то в пределе получим мгновенный выброс. Тогда, при равной массе выброшенного вещества большую опасность будет представлять кратковременный, но интенсивный выброс, т.к. в этом случае будут достигаться более высокие концентрации опасного химического вещества в воздухе.

Выводы. С учетом ветра, описываемого вектором скорости со случайными компонентами, построена математическая модель определения концентрации ОХВ в воздухе от источника ОХВ, при условии, что интенсивность истечения ОХВ в воздух описывается П-образной функцией. Показано, что ситуации с мгновенным выбросом ОХВ в воздух и постоянно действующим источником являются предельными для данного случая при $t_0 \rightarrow 0$ и $t_0 \rightarrow \infty$ соот-

ветственно, где t_0 – время прекращения действия источника. Показано, что при равной массе выброшенного вещества большую опасность представляет кратковременный, но более интенсивный выброс. Математическая модель позволяет прогнозировать границы зон, в которых концентрация ОХВ превышает допустимые значения, что позволяет руководителю ликвидации ЧС, связанной с утечкой ОХВ в атмосферу, принимать меры безопасности для личного состава подразделений МЧС и населения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моніторинг надзвичайних ситуацій. Підручник /Абрамов Ю.О., Грінченко Є.М., Кірючкін О.Ю., Коротинський П.А., Миронець С.М.- Вид-во: АЦЗУ м. Харків, 2005.- 530с.
2. Моделирование аварийных ситуаций на опасных производственных объектах. Программный комплекс ТОКСИ+ (версия 3.0): Сборник документов. Серия 27. Выпуск 5 /Колл. авт.– М.:Научно-технический центр по безопасности в промышленности, 2006. – 252 с.
3. Басманов А.Е., Говаленков С.С. Математическая модель диффузии паров опасных химических веществ в воздухе. // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Зб. наук. пр. УЦЗ України. Вип. 8. – Харків: УЦЗУ, 2008. – С.29-39.
4. Басманов А.Е., Говаленков С.С., Панина Е.О. Оценка вероятности превышения концентрацией вещества в воздухе допустимого значения. // Проблемы надзвичайних ситуацій. Зб. наук. пр. УЦЗ України. Вип.9. – Харків: УЦЗУ, 2009. – С. 39-45.
5. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982.
6. Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.
nuczu.edu.ua