

С.С. Говаленков, інженер, НУГЗУ

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ НА ПРИМЕРЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОБЛАКА ОПАСНОГО ХИМИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В АТМОСФЕРЕ

(представлено д.т.н. Басмановым Э.А.)

Рассмотрены используемые на практике модели и методы прогнозирования распространения опасных химических веществ в воздухе, а также методика ГСЧС Украины для аварийного и оперативного прогнозирования. Проведен анализ преимуществ и недостатков указанных моделей.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, опасное химическое вещество, первичное и вторичное облако, диффузия в атмосфере.

Постановка проблемы. Аварии на химически опасных объектах часто сопровождаются выбросом опасных химических веществ (ОХВ) в окружающую среду, где их распространение создает угрозу жизни и здоровью не только обслуживающему персоналу, но и населению на прилегающей территории. В особо неблагоприятных случаях количество пострадавших и погибших может исчисляться тысячами (выброс метилизоцианата, Индия, 1984). Поэтому одной из проблем является предсказание последствий аварий, сопровождающихся выбросом ОХВ, что необходимо для выявления опасностей, построения плана локализации и ликвидации аварии.

Анализ последних исследований и публикаций. Используемая в подразделениях ГСЧС Украины методика [2] предусматривает оперативное (долгосрочное) и аварийное (краткосрочное) прогнозирование. Оперативное прогнозирование осуществляется предварительно для определения потенциальной опасности, возможных масштабов химического заражения, построения ПЛАС и др. Аварийное прогнозирование осуществляется при возникновении аварии по данным разведки для уточнения данных оперативного прогнозирования, определения возможных последствий аварии и порядка действий в зоне химического заражения.

Для оперативного прогнозирования принимаются наихудшие условия: мгновенный разлив всего ОХВ из емкости, скорость ветра 1 м/с, температура воздуха 20°C, инверсия, а распространение облака принимается круговым во всех направлениях. Для таких условий с помощью специальных таблиц определяется глубина зоны поражения Г [2].

При аварийном прогнозировании принимаются реальные метеорологические условия: температура воздуха, скорость и направление ветра, состояние атмосферы. При этом зона возможного химического загрязне-

ния $S_{\text{ЗВХЗ}}$ принимается в виде сектора круга, угол которого определяется скоростью ветра – табл. 1 [2].

Табл. 1. Угол сектора при определении зоны возможного химического загрязнения при аварийном прогнозировании

Скорость ветра, м/с	<1	1	2	>2
Угол, φ , град.	360	180	90	45

Прогнозируемая зона химического загрязнения принимается в виде эллипса, большая полуось которого совпадает с направлением ветра. Глубина прогнозируемой зоны химического заражения Γ (км) совпадает с глубиной зоны возможного химического заражения, а ширина Π (км) [2]

$$\Pi = 0,3\Gamma^{0,6} \text{ (инверсия);}$$

$$\Pi = 0,3\Gamma^{0,75} \text{ (изотермия);}$$

$$\Pi = 0,3\Gamma^{0,95} \text{ (конвекция).}$$

Недостатком действующей методики является эмпирический характер формул, лежащих в ее основе, что может приводить к значительным погрешностям при использовании ее в условиях, отличных от тех, в которых были получены эти эмпирические формулы. Кроме того, данная методика предназначена только для прогнозирования распространения первичного облака ОХВ.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является анализ существующих моделей и методов прогнозирования распространения облака ОХВ в воздухе.

На распространение газообразной примеси на открытом пространстве оказывают влияние:

- ветер;
- турбулентная диффузия;
- молекулярная диффузия;
- сила тяжести.

В то время как наличие ветра задает движение облака в определенном направлении, диффузия приводит к его рассеиванию в вертикальном и горизонтальном направлениях. При этом для приземного слоя атмосферы коэффициент турбулентной диффузии (т.е. отношение турбулентного потока примеси к градиенту концентрации) имеет значение порядка $1 \div 10 \text{ м}^2/\text{с}$ [3], что в $10^5 \div 10^6$ раз больше коэффициента молекулярной диффузии χ , который для большинства газов имеет порядок $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Турбулентность в атмосфере имеет место всегда, независимо от наличия или отсутствия ветра. В качестве примера на рис. 1. приведена запись ко-

лебаний во времени скорости ветра в атмосфере вблизи земли, полученные в результате измерений с помощью малоинерционных приборов [3].

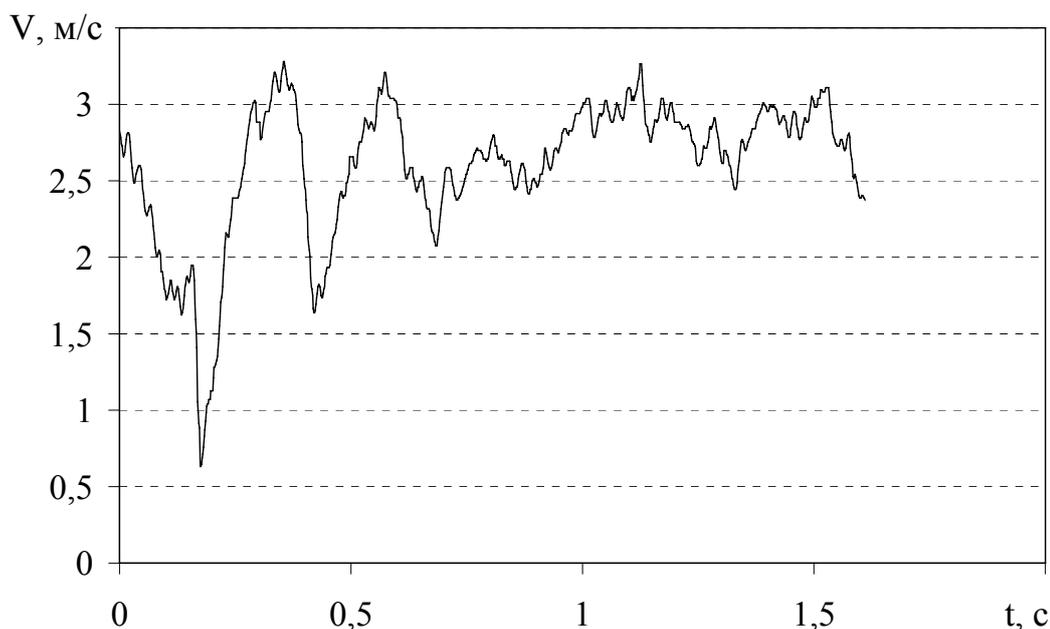


Рис. 1. Пульсации горизонтальной составляющей скорости ветра

Таким образом, на распространение некоторого вещества в атмосфере решающее значение оказывает именно турбулентная диффузия, а влиянием молекулярной диффузии можно пренебречь.

Сила тяжести оказывает существенное воздействие на процесс распространения только тяжелых газов, плотность которых заметно выше плотности воздуха, например, хлора (тяжелее воздуха в 2,5 раза). Для легких газов, плотность которых близка к плотности воздуха (например, аммиак), влиянием силы тяжести можно пренебречь.

Развитие методов прогноза рассеяния химических веществ в воздухе осуществляется, главным образом, по двум направлениям [4]:

- разработка теории атмосферной диффузии на основе математического описания распространения веществ с помощью решения уравнения турбулентной диффузии;
- эмпирико-статистический анализ распространения загрязняющих веществ в атмосфере с использованием для этой цели интерполяционных моделей гауссовского типа.

Первое направление является более универсальным, т.к. дает описание распространения веществ от различных источников при различных условиях среды. Оно дает возможность использовать параметры турбулентного обмена, применяемые в метеорологических задачах тепло- и влагообмена в атмосфере [5].

Распространенность второго направления объясняется простотой использования гауссовых моделей для описания закономерностей распределения примеси в атмосфере.

В общем виде математическая модель диффузии легкой газообразной примеси в воздухе может быть представлена дифференциальным уравнением параболического типа [4, 6]

$$\frac{\partial q}{\partial t} + v_x \frac{\partial q}{\partial x} + v_y \frac{\partial q}{\partial y} + v_z \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} a_x \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} a_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} a_z \frac{\partial q}{\partial z} - \alpha q + \Phi, \quad (1)$$

где $q(x, y, z, t)$ – концентрация вещества в точке с координатами (x, y, z) в момент времени t ; v_x, v_y, v_z – составляющие средней скорости перемещения вещества (скорости ветра) в направлении осей X, Y, Z соответственно; a_x, a_y, a_z – коэффициенты диффузии в направлении соответствующих координатных осей; α – коэффициент, определяющий изменение концентрации за счет превращения диффундирующего вещества; $\Phi(x, y, z, t)$ – объемная плотность источников вещества. Уравнение (1) замыкается с помощью начального условия

$$q(x, y, z, 0) = q_0, \quad (2)$$

описывающего концентрацию вещества в воздухе в начальный момент времени, и граничных условий. Граничные условия на бесконечном удалении от источника от источника принимаются в соответствии с предположением о том, что концентрация убывает до нуля [4]:

$$\begin{aligned} q &\rightarrow 0, \text{ при } |x| \rightarrow \infty; \\ q &\rightarrow 0, \text{ при } |y| \rightarrow \infty; \\ q &\rightarrow 0, \text{ при } |z| \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

При формулировке граничного условия над подстилающей поверхностью выделяют случаи, когда вещество распространяется над водной поверхностью. Обычно полагают, что вода поглощает распространяющееся вещество, поэтому его концентрация у поверхности воды равна нулю [4]

$$q|_{z=0} = 0.$$

С поверхностью почвы диффундирующее вещество, как правило, взаимодействует слабо. Попав на нее, примеси не накапливаются, а с турбулентными вихрями снова уносятся в атмосферу [4]. Поэтому принимается, что средний турбулентный поток вещества у земной поверхности равен нулю

$$\left. \frac{\partial q}{\partial z} \right|_{z=0} = 0.$$

Выбор начального условия (2) и объемной плотности источников вещества $\Phi(x, y, z, t)$ определяется типом облака:

- для первичного облака ОХВ:

$$\begin{aligned} q(x, y, z, 0) &= m\delta(x)\delta(y)\delta(z - H), \\ \Phi(x, y, z, t) &= 0, \end{aligned}$$

где m – масса испарившегося вещества, кг; $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака; $(0, 0, H)$ – координаты точки, в которой произошел выброс ОХВ.

- для вторичного облака ОХВ

$$\begin{aligned} q(x, y, z, 0) &= 0, \\ \Phi(x, y, z, t) &= E\delta(x)\delta(y)\delta(z - H), \end{aligned}$$

где E – интенсивность выброса ОХВ в атмосферу, кг/с.

Модель (1)-(2) с теми или иными упрощениями лежит в основе большинства методик, применяемых на практике. В частности, это методика МАГАТЭ [7], где коэффициенты диффузии в поперечном (относительно ветра) и вертикальном направлениях задаются таблично в зависимости от скорости ветра и состояния атмосферы. Ее недостатком является прогноз только стационарного распределения концентраций ОХВ в атмосфере, не позволяющий оценить распределение концентраций для непродолжительного во времени выброса. Игнорирование слагаемого, содержащего коэффициент диффузии в направлении ветра, делает невозможным использование модели в условиях штиля.

В основу методики Института экспериментальной метеорологии [8] положены степенные зависимости коэффициента вертикальной диффузии и вертикальной скорости от высоты:

$$a_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n, \quad v_z = v_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m,$$

где k_1, z_1, n, v_1, z_1, m – некоторые коэффициенты. Данная модель дает более точный прогноз, чем предыдущая, но только при условии наличия дополнительной информации – измерениями направления и скорости ветра в процессе распространения облака или применением модели атмосферных течений при заданных метеоусловиях.

В основе методики расчета концентрации вещества в воздухе ОНД-86 [9] лежит формула

$$q = \frac{AMFmn}{H^2 \sqrt[3]{V\Delta T}},$$

где A – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы и определяющий условия вертикального и горизонтального рассеяния вещества в воздухе, $c^{2/3} \cdot \text{мг} \cdot \text{К}^{1/3} \cdot \text{г}^{-1}$; M – количество вещества, выбрасываемого в атмосферу, $\text{г}/\text{с}$; F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосфере; m , n – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса; H – высота источника выброса над уровнем земли, м ; $\Delta T = T_r - T_0$; T_r , T_0 – температуры выбрасываемой газовой смеси и окружающего воздуха соответственно, К ; V – объем газовой смеси.

Данная методика была разработана для различных устройств для выбросов предприятий, расчета санитарно-защитной зоны. Модель позволяет определить только установившегося распределения концентрации вещества в атмосфере. Другим недостатком является отсутствие рекомендаций для расчета рассеяния вещества при заданных конкретных метеорологических условиях.

Одними из наиболее детально проработанных эмпирических моделей, являются модели, лежащие в основе методик ТОКСИ (ТОКСИ 1 [10], ТОКСИ 2 [11], ТОКСИ 3 [12]). В основе методики ТОКСИ 2 лежит модель рассеяния вещества в атмосфере вида

$$q(x, y, z, t) = \begin{cases} \frac{M}{v_x (2\pi R^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} G_n(x, y, z), & x \leq x_{\text{гр}}(t^{\text{ж}}), t > x/v_x, \\ 0, & x \leq x_{\text{гр}}(t^{\text{ж}}), t \leq x/v_x \text{ или } t \geq x/v_x + t^{\text{ж}}, \\ \frac{Mt^{\text{ж}}}{2\pi R^2 t^{\text{ж}} v_x + (2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} G_3(x, y, z, t), & x > x_{\text{гр}}(t^{\text{ж}}), \end{cases} \quad (3)$$

где R – начальный размер вторичного облака ОХВ, образующегося при истечении жидкого ОХВ из разрушенного оборудования; $x_{\text{гр}}(t)$ – пространственная граница перехода от рассеяния непрерывного выброса длительностью t к рассеянию залпового выброса; $t^{\text{ж}}$ – длительность истечения жидкости; v_x – скорость ветра на высоте 10 м;

$$G_H(x, y, z) = \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right];$$
$$G_3(x, y, z, t) = \exp\left(-\frac{(x-v_x t)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right];$$

величины дисперсий $\sigma_x(x)$, $\sigma_y(y)$, $\sigma_z(x)$ принимаются в зависимости от координаты x , шероховатости поверхности и класса стабильности атмосферы.

В методике ТОКСИ 3 по сравнению с формулой (3) введен ряд дополнительных параметров, в частности, учтено гравитационное растекание облака, тепловой поток в облако, масштаб Монина-Обухова, модифицировано выражение для рассеивания в поперечном и вертикальном направлениях и др. [12].

Недостатком такого подхода является использование большого количества эмпирических зависимостей, полученных для конкретных метеорологических условий, и приводящих к погрешностям при их применении в других условиях.

Выводы. Проведен анализ моделей и методов прогнозирования распространения облака ОХВ в атмосфере. Показано, что используемая в подразделениях МЧС Украины методика прогнозирования распространения ОХВ в воздухе опирается на упрощенные эмпирические модели, полученные для конкретных условий. В то же время, современное развитие вычислительной техники и ее миниатюризация позволяют использовать более совершенные модели, опирающиеся на уравнения диффузии с теми или иными допущениями и начальными и краевыми условиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маршалл В. Основные опасности химических производств [Текст] / В. Маршалл. – М.: Мир, 1989. – 672 с.
2. Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. Затверджено наказом Міністерства з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи, Міністерства аграрної політики, Міністерством екології і природних ресурсів від 27.03.2001 № 73/82/64/122.
3. Монин А.С. Статистическая гидромеханика. Ч.1 [Текст] / А.С. Монин, А.М. Яглом. – М.: Наука, 1965. – 640 с.
4. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы [Текст] / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеоздат, 1985. – 272 с.

5. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы [Текст] / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
6. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики [Текст] / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 735 с.
7. Techniques and decision making in the assessment of off-site consequences of an accident in a nuclear facility [Text]. Safety series N 86. – Vienne, 1987. – 185 p.
8. Левченко Н.А. Конкурс расчетных методик рассеяния загрязняющих веществ в атмосферном воздухе [Текст] / Н.А. Левченко, А.А. Евстратьев, В.Д. Гогунский // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса: ОПУ, 1997. – Вып. 2. – С. 63-67.
9. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий [Текст]. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 52 с.
10. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «ТОКСИ») [Текст]. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 1993. – 19 с.
11. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси 2.2») // Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: Сборник документов [Текст]. – М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2002. – Сер. 27. – Вып. 2. – 208 с.
12. Методика оценки последствий аварийных выбросов опасных веществ (Методика «Токси 3») [Текст]. – М.: ФГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2007. – 67 с.

Получено редколлегией 26.09.2017

С.С. Говаленков

Аналіз моделей і методів прогнозування надзвичайної ситуації на прикладі розповсюдження хмари небезпечної хімічної речовини в атмосфері

Розглянуто моделі і методи прогнозування розповсюдження небезпечних хімічних речовин у повітрі, які мають практичне використання, а також методика ДСНС України для аварійного і оперативного прогнозування.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, небезпечна хімічна речовина, первинна і вторинна хмара, дифузія в атмосфері.

S.S. Govalenkov

Analysis of models and methods of forecasting the emergency situation with the example of diffusion of dangerous chemical substance cloud in the atmosphere

Models and methods for forecasting the spread of hazardous chemicals in the air as well as the methodology of the SES of Ukraine for emergency and operational forecasting were reviewed. The advantages and disadvantages of these models were analyzed.

Keywords: emergency situation, dangerous chemical substance, primary and secondary cloud, diffusion in the atmosphere.