

УДК 517.917

© В. М. Колодкин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ НА ОПАСНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Предложены модели для оценки уровня опасности опасных производственных объектах. Продемонстрированы методы оценки на примере прогнозирования последствий химических аварий.

Ключевые слова: риск, последствия аварий.

Введение

Общепринятой характеристикой уровня аварийной опасности являются оценки риска. Можно выделить основные области приложения теории аварийного риска.

- Поддержка принятия решений по принципиальным схемам и основным технологическим приемам на техногенном объекте, обеспечивающих приемлемый уровень безопасности жизнедеятельности и безопасности окружающей природной среды.
- Поддержка принятия решений по размещению техногенных объектов.
- Разработка планов обеспечения безопасности жизнедеятельности, защиты окружающей природной среды в случае возникновения чрезвычайных ситуаций, обусловленных антропогенными катастрофами.

§ 1. Модели прогноза аварийного риска

Разнообразие проявления опасности соответствует разнообразию оценок риска. Оценки аварийного риска, как правило, характеризуют верхнюю границу уровня потенциальной опасности, порождаемой техногенным объектом.

Что лежит в основе прогнозирования уровня опасности? Для объектов, которые не имеют аналогов, по которым отсутствует достоверная статистическая информация, единственным подходом к прогнозированию последствий, является подход, основанный на результатах компьютерного прогнозирования.

Введем обозначения: P_z – прогнозируемая вероятность появления z -го аварийного процесса в течение года, U_k^z – прогнозируемый ущерб от аварии. В принятых обозначениях выражение для оценки аварийного риска R , характеризующего уровень опасности в некоторой точке (r, φ) , может быть представлено в виде:

$$R(r, \varphi) = \sum_z P_z \cdot W_{(r, \varphi)}^z, \quad (1.1)$$

где оценка условного аварийного риска, связанная с z -ой аварией, определяется следующим образом:

$$W_{(r, \varphi)}^z = \sum_k \nu_k \cdot U_k^z(r, \varphi). \quad (1.2)$$

Оценка условного аварийного риска характеризует прогнозируемые последствия аварии конкретного типа. Для объектов с наличием высокотоксичных веществ, где главным поражающим воздействием является токсическое воздействие, прогнозируемые последствия аварии, и,

соответственно, величина ущерба U_k^z , зависят от климатических условий (температуры воздуха, скорости ветра, направления ветра и так далее). Поэтому в выражение для оценки условного аварийного риска входит вероятность проявления k -го набора климатических характеристик окружающей среды - ν_k .

Оценка условного аварийного риска W^z является характеристикой уровня опасности, порождаемой техногенным объектом, при условии, что аварийная ситуация развивалась по определенному сценарию. В зависимости от вида аварийного воздействия и способа его передачи строятся конкретные выражения для оценок условного аварийного риска.

Конкретизируем вид аварийного воздействия и элемент абиотической среды, через которую воздействие передается человеку. В частном случае токсического воздействия на человека через атмосферный воздух при реализации конкретного сценария аварийной ситуации, выражение (1.2) имеет вид:

$$W^z(r, \varphi) = \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^{t_a} dt \int_0^{V_{\max}} dV \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \mu(\alpha)\lambda(V) \cdot \left(\sum_i P(V \in \delta V | d_i) \right) \eta(\bar{t}) \chi(T) \times \quad (1.3) \\ \times U(r, \varphi, d_i, t, \alpha, V, T) dT,$$

где: $\mu(\alpha)$ - плотность распределения вероятностей направлений ветра, определяемых величиной значения угла α ; $\lambda(V)$ - плотность распределения вероятностей значений скорости ветра V ; $P(V \in \delta V | d_i)$ - вероятность того, что при скорости ветра $V \in \delta V$ состояние устойчивости атмосферы относится к классу устойчивости d_i ; $\eta(\bar{t})$ - плотность распределения вероятностей невыпадения осадков в виде дождя; t_a - временной масштаб токсического воздействия при передаче воздействия через атмосферный воздух; $\chi(T)$ - плотность распределения вероятностей значений температуры атмосферного воздуха; $U(r, \varphi, d_i, t, \alpha, V, T)$ - функция, характеризующая ущерб при реализации конкретного аварийного сценария. Введена полярная система координат (r, φ) с началом в точке центра источника опасности.

Функция ущерба $U(r, \varphi, d_i, t, \alpha, V, T)$ выражает частоту поражения реципиента риска в точке (r, φ) . Оценка условного риска характеризует последствия конкретной аварии и, как следует из выражения (1.3), не может превышать по величине единицы.

Если положить, что $R(r, \varphi) \leq 1$, то оценке локального (то есть отнесенного к некоторой точке) аварийного риска можно придать ясный смысл. Оценка локального аварийного риска отвечает прогнозируемой доле пораженных реципиентов риска в точке (r, φ) за определенный временной интервал. В качестве временного интервала обычно выбирается один год. При этом предполагается, что реципиент риска находится в выделенной точке 24 часа в сутки без средств защиты. То есть оценка локального риска - характеристика точки местности в отношении уровня опасности, связанной с техногенным объектом.

Поле оценок локального аварийного риска, связанного с техногенным объектом, может быть представлено на карте местности. При этом выделяются зоны, отвечающие различным уровням R^* . Зоны выделяются условием $R(r, \varphi) > R^*$. Площадь зоны определяется в соответствии с картой района размещения объекта. Если вводится в рассмотрение несколько уровней риска, то обеспечивается разделение прогнозируемой области поражения по уровню потенциальной опасности. Размер области характеризуется эффективным радиусом $R_{\text{эфф}}$.

Оценка условного аварийного группового риска в точке $(r, \varphi) \in \Omega$

$$W_g^z(r, \varphi) = \psi(r, \varphi) W^z(r, \varphi). \quad (1.4)$$

где $\psi(r, \varphi)$ - плотность распределения людей в зоне поражения Ω , $(r, \varphi) \in \Omega$. Плотность распределения людей по зоне Ω отвечает условию нормировки -

$$M = \int_{\Omega} \psi(r, \varphi) d\Omega,$$

где M - общая численность людей в области Ω . Оценка группового (популяционного) риска характеризует уровень потенциальной опасности с учетом количества реципиентов риска, отнесенных к точке. По смыслу оценка соответствует количеству пораженных реципиентов риска в результате z -ой аварии в точке (r, φ) за временной интервал один год.

Важной характеристикой уровня опасности, порождаемой объектом, является максимальное количество летальных исходов. Характеристика может относиться к определенной аварии N_{let}^z и в целом к объекту N_{let} :

$$N_{\text{let}}^z = \max_{\Omega} \int \psi(r, \varphi) \cdot U(r, \varphi, d_i, t, \alpha, V, T) d\Omega, \quad (1.5)$$

$$N_{\text{let}} = \max\{N_{\text{let}}^z\}. \quad (1.6)$$

В выражении (1.5): $\psi(r, \varphi)$ - плотность распределения людей по области Ω , $U(r, \varphi, d_i, t, \alpha, V, T)$ - функция ущерба при аварии. Климатические параметры отвечают максимальному поражающему эффекту. В частности, если под областью Ω понимается территория населенного пункта, то направление вектора скорости ветра соответствует направлению от объекта к населенному пункту. Остальные климатические параметры находятся из решения задачи поиска максимального числа пораженных реципиентов риска в области Ω .

Отметим, что представленные оценки риска характеризуют верхнюю границу уровней опасности, так как не учитываются какие-либо действия, направленные на ослабление последствий аварий.

§ 2. Прогнозирование последствий аварий на техногенных объектах

Общая процедура прогнозирования последствий аварий на промышленном объекте, включает:

- Прогнозирование вероятностей аварийных сценариев;
- Расчет частот возникновения определенных климатических условий;
- Прогнозирование параметров источников аварийной опасности;
- Математическое моделирование распространения аварийных воздействий;
- Прогнозирование реакций реципиентов риска на аварийные воздействия;
- Расчет характеристик уровней аварийной опасности.

Рамки данной работы не позволяют детально рассмотреть всю процедуру прогнозирования уровня аварийной опасности. Тем более что, такие разделы общей схемы как прогнозирование параметров источников опасности, в значительной степени определяются имманентными свойствами техногенных объектов. Это означает, что и математические модели, описывающие аварийные сценарии, должны отражать особенности, присущие конкретному объекту. Вместе с тем, существует определенный круг задач, которые можно считать общими для всей проблемы оценки уровня аварийной опасности. Одной из таких задач является задача переноса примеси в атмосфере. Она описывает распространение аварийной опасности, например, при аварийном выбросе в атмосферу.

Прогнозирование распространения примеси в атмосфере

При формулировке исходных уравнений, описывающих процесс распространения примесей в атмосфере и изменение их концентраций во времени, используется возможность отделения пульсаций от средних значений концентраций примеси. Это позволяет с помощью известных

приемов осреднения перейти от уравнения диффузии для мгновенных концентраций к уравнению для средних концентраций.

Процесс переноса инертной примеси в атмосфере описывается уравнением турбулентной диффузии [1]:

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} + \sum_{\alpha=1}^3 u_{\alpha} \frac{\partial q_i}{\partial x_{\alpha}} = \sum_{\alpha=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} K_{\alpha} \frac{\partial q_i}{\partial x_{\alpha}} + \sum_j f_{ij}, \quad (2.1)$$

где t - время; x_{α} - декартовы прямоугольные координаты; q_i - концентрация i -ой компоненты примеси; u_{α} и K_{α} - проекции на ось α средней скорости ветра и коэффициента турбулентного обмена; $f_{ij} = f_{ij}(q_i, q_j)$ - объемные источники и стоки, характеризующие превращение i -той компоненты в j -ую.

Обычно в декартовой системе координат оси x_1 и x_2 , расположенные в горизонтальной плоскости, обозначают через x и y , а вертикальную ось x_3 - через z ; соответственно $u_1 \equiv u$, $u_2 \equiv v$, $u_3 \equiv w$ и $K_1 \equiv K_x$, $K_2 \equiv K_y$, $K_3 \equiv K_z$.

При решении практических задач уравнение (2.1) упрощается. Так, если ось x ориентирована по направлению средней скорости ветра, то $v = 0$. При анализе распространения паров токсичных веществ в атмосфере принимается $w = 0$.

Уравнение турбулентной диффузии отвечает приближению пассивной примеси, то есть примеси, не оказывающей влияния на динамическое состояние атмосферы. Кинетика процессов переноса примеси зависит от состояния атмосферы, которое характеризуется вертикальными профилями средней скорости ветра и коэффициентов турбулентной диффузии, дисперсией отклонения ветра от среднего направления ветра, а также поворотом ветра с высотой. Коэффициенты турбулентной диффузии и профили ветра могут быть восстановлены методами турбулентной теории подобия по данным стандартных наземных метеорологических наблюдений.

При проведении конкретных расчетов уравнение (2.1) дополняется граничными и начальными условиями. На бесконечном удалении от источника загрязнения атмосферы компонентами токсичного вещества граничные условия принимаются в соответствии с естественным предположением о том, что при этом их концентрация убывает до нуля [2]:

$$\begin{aligned} q_i|_{|y| \rightarrow \infty} &\rightarrow 0, \\ q_i|_{|z| \rightarrow \infty} &\rightarrow 0. \end{aligned}$$

Граничные условия на подстилающей поверхности $z = 0$ в общем случае формулируются как граничные условия III рода:

$$K_z \frac{\partial q_i}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_i q_i + \beta_i,$$

где коэффициенты зависят от конкретного сценария аварийной ситуации, рассматриваемого компонента отравляющего вещества и свойств подстилающей поверхности.

С поверхностью почвы примеси обычно взаимодействуют слабо. Попав на нее, примеси здесь не накапливаются, а с турбулентными вихрями снова уносятся в атмосферу. Поэтому с достаточной точностью принимается, что средний турбулентный поток примеси у земной поверхности мал, т.е. есть:

$$K_z \frac{\partial q_i}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0.$$

Для численного решения уравнения (7) применяется локально-одномерная схема, заданная на неравномерной ортогональной разностной сетке. Для адвективного переноса используется схема «разности против потока»; для турбулентной диффузии - схема второго порядка точно-

сти по координате:

$$\begin{aligned}
 & \frac{q_{ijk}^{n+1/3} - q_{ijk}^n}{\tau} + \begin{cases} w_k \frac{q_{ijk}^{n+1/3} - q_{ijk-1}^{n+1/3}}{h_{z_{k-1}}}, & w_k > 0 \\ w_k \frac{q_{ijk+1}^{n+1/3} - q_{ijk}^{n+1/3}}{h_{z_k}}, & w_k < 0 \end{cases} - \\
 & - \frac{1}{\tilde{h}_{z_k}} \left(K_{z_{k+1/2}} \frac{q_{ijk+1}^{n+1/3} - q_{ijk}^{n+1/3}}{h_{z_k}} - K_{z_{k-1/2}} \frac{q_{ijk}^{n+1/3} - q_{ijk-1}^{n+1/3}}{h_{z_{k-1}}} \right) = 0, \\
 & \frac{q_{ijk}^{n+2/3} - q_{ijk}^{n+1/3}}{\tau} + \begin{cases} v_j(z_k) \frac{q_{ijk}^{n+2/3} - q_{ij-1k}^{n+2/3}}{h_{y_{j-1}}}, & v_j > 0 \\ v_j(z_k) \frac{q_{ij+1k}^{n+2/3} - q_{ijk}^{n+2/3}}{h_{y_j}}, & v_j < 0 \end{cases} - \\
 & - \frac{K_y(z_k)}{\tilde{h}_{y_j}} \left(\frac{q_{ij+1k}^{n+2/3} - q_{ijk}^{n+2/3}}{h_{y_j}} - \frac{q_{ijk}^{n+2/3} - q_{ij-1k}^{n+2/3}}{h_{y_{j-1}}} \right) = 0, \\
 & \frac{q_{ijk}^{n+1} - q_{ijk}^{n+2/3}}{\tau} + u_i(z_k) \frac{q_{ijk}^{n+2/3} - q_{i-1jk}^{n+2/3}}{h_{x_{i-1}}} - \\
 & - \frac{K_x(z_k)}{\tilde{h}_{x_i}} \left(\frac{q_{i+1jk}^n - q_{ijk}^{n+1}}{h_{x_i}} - \frac{q_{ijk}^{n+1} - q_{i-1jk}^{n+1}}{h_{x_{i-1}}} \right) = 0,
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

где $h_{\alpha_k} = \alpha_{k+1} - \alpha_k$ - шаг разностной схемы по пространству вдоль оси α , $\tilde{h}_{\alpha_k} = (h_{\alpha_k} + h_{\alpha_{k-1}})/2$, $\alpha \equiv x, y, z$. В соотношениях (2.2) нижний индекс соответствует координатному направлению, совпадающему с направлением среднего ветра. Нижние индексы j, k отвечают нумерации узлов разностной схемы по направлениям y и z , соответственно. Верхние индексы соответствуют номеру временного слоя. Величина τ отвечает шагу разностной схемы по времени. Заметим, что в разностном уравнении для переноса вдоль оси используется явно-неявная схема, что позволяет эффективно распараллелить решение уравнений (2.2) при сохранении устойчивости схемы.

Уравнение переноса (2.1) в разностной постановке (2.2) удобно для организации параллельных вычислений, так как решение уравнения переноса в каждом узле i разрешается явным образом [3]:

$$q_{ijk}^{n+1} = \frac{q_{ijk}^{n+2/3} + C_{2i} q_{i+1jk}^n + [C_{1i} + C_{3i}] q_{i-1jk}^{n+1}}{1 + C_{1i} + C_{2i} + C_{3i}},$$

где введены обозначения: $C_{1i} = \tau u_i/h_{x_i}$, $C_{2i} = \tau K_x/(h_{x_i} \tilde{h}_{x_i})$, $C_{3i} = \tau K_x/(h_{x_{i-1}} \tilde{h}_{x_i})$. Пусть p - число подчиненных процессов (ПП), N_p - число узлов разностной сетки, приходящихся на ПП p , а $i_p \in [0, N_p - 1]$ - индекс, нумерующий узлы в ПП p . Тогда вводя одномерное разбиение расчетной области вдоль оси x , решение в каждой подобласти p может быть получено параллельно, если для сшивки решений между подобластями использовать следующее уравнение[4]:

$$q_{0jk}^{n+1} = \frac{q_{0jk}^{n+2/3} + C_{21} q_{1jk}^n + [C_{10} + C_{3_{N_p-1}}] q_{N_p-1jk}^n}{1 + C_{10} + C_{21} + C_{3_{N_p-1}}},$$

Таким образом, для получения решения в каждой подобласти p на шаге по времени $n + 1$ требуется знать только решение на шаге n в слое $i_p = N_p - 1$ (левый ПП) и в слое $i_{p+1} = 0$ (правый ПП). Эффективность параллельного алгоритма характеризуется коэффициентом повышения быстродействия $\sigma = \frac{t_1}{t_p}$, где t_i - время решения задачи на ЭВМ с i -процессорами. Численные и теоретические оценки коэффициента σ показали, что алгоритм решения уравнения турбулентной диффузии достаточно эффективен в сетевых вычислительных системах (набор однопроцессорных ЭВМ, соединенных относительно малопроизводительной локальной сетью). Так, при пропускной способности сети 10 Мбит/с практически линейный рост

σ наблюдается для $p < 5$. Тогда как, при производительности сети в 100 Мбит/с эффективно может использоваться до 10 ЭВМ.

В процессе моделирования рассчитывается временная зависимость концентрации токсичного вещества и величина токсической дозы (накопленная концентрация) для точек подстилающей поверхности.

§ 3. Оценка уровня опасности, связанной с заводом по уничтожению химического оружия

Для иллюстрации рассмотрим некоторые результаты по оценке уровня потенциальной аварийной опасности, порождаемой объектом утилизации химического оружия в Щучанском районе Курганской области.

Таблица 1 иллюстрирует вклад различных типов аварий в общий уровень аварийной опасности, порождаемой объектом утилизации. Сопоставление типов аварий выполнено в терминах интегральных оценок (нормированных) аварийного риска. Оценки, в частности, показывают, что наиболее значимым по последствиям аварийным сценарием является сценарий с пожаром. Вклад последствий аварий при аварийном сценарии с пожаром в общий уровень потенциальной опасности составляет около 90%.

Таблица 1. Сопоставление последствий различных типов аварий на объекте утилизации

Описание типов аварий	Интегральная оценка аварийного риска для типа аварии (нормированная)	Вклад последствий аварий в общий уровень опасности, %
Аварии, связанные с выбросом боевых отравляющих веществ, при пожаре на объекте утилизации	$6,53 \times 10^{-4}$	90,13
Аварии, связанные с проливом и последующим испарением боевых отравляющих веществ	$6,57 \times 10^{-5}$	9,06
Аварии, связанные со взрывом газозооных смесей	$5,72 \times 10^{-6}$	0,79
Аварии, связанные с аварийными проливами боевых отравляющих веществ внутри производственных помещений	$1,29 \times 10^{-7}$	0,02
Интегральная оценка аварийного риска для всех типов аварий	$7,25 \times 10^{-4}$	

Таблица 2. Характеристики зон аварийного риска

	Значения оценок аварийного риска			
	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
Максимальный радиус зоны, м	500	2700	8600	12000
Средний радиус зоны, м	302,78	1885	6721,94	11198,61

В таблице 2 представлены эффективные радиусы, отвечающие соответствующим зонам по уровню аварийной опасности. В частности, максимальное расстояние от объекта, на котором уровень опасности достигает величины 10^{-6} – около 500 метров.

Таблица 3. Распределение аварийного группового риска в зависимости от расстояния от объекта утилизации

Расстояние от ОУХО, км	Население, чел	Групповой риск
0... 5	95	$9,06 \times 10^{-7}$
0... 10	2445	$2,87 \times 10^{-6}$
0... 15	3726	$3,043 \times 10^{-6}$
0... 20	6574	$3,045 \times 10^{-6}$
0... 25	16259	$3,047 \times 10^{-6}$

В России законодательно не утвержден так называемый стандарт безопасности, то есть уровень допустимого риска, порождаемый техногенным объектом. Но в общепринятой практике этот уровень соответствует величине 10^{-6} . Таким образом, вне пятисот метровой зоны вокруг объекта, уровень опасности соответствует общепринятой величине допустимого уровня аварийного риска, и, следовательно, допустимому уровню аварийной опасности.

Интегральные оценки аварийного группового риска представлены в таблице 3. Интегральная величина аварийного группового риска по 25-км зоне (зоне поражения) составляет величину около $1,76 \times 10^{-5}$. То есть во всей зоне поражения при аварии на объекте утилизации можно ожидать около двух летальных исходов за 10^5 лет. Средняя вероятность гибели одного человека в зоне поражения составляет величину $P \approx 10^{-9}$.

§ 4. Заключение

Характеристика уровня опасности, выраженная в категориях оценок аварийного риска, определяет стратегию работ по обеспечению безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей природной среды в районах опасных техногенных объектов.

Логика развития работ по прогнозу и оценки последствий аварий на промышленных объектах требует концентрации усилий специалистов разного профиля в следующих основных направлениях. Во-первых, разработка методов прогнозирования долговременных последствий аварий. Возможно, именно долговременные последствия будут определяющими при анализе ущерба относительно состояния здоровья человека и состояния окружающей природной среды. Об этом говорит анализ последствий аварий и катастроф, имевших место в прошлом. Во-вторых, это разработка теоретических основ и методов прогнозирования, а также оценок риска относительно воздействия на биосферу как единого целого. Эта проблема отчасти включает в себя предыдущую, но в основном она представляет собой общенаучную задачу изучения взаимосвязей между элементами биосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Том 1. Л.: Гидрометеиздат, 1992, с. 693.
2. Бызова Н. Л., Гаргер Е. К., Иванов В. Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеиздат, 1991, с. 274.
3. Самарский А. А., Попов Ю. П. Разностные методы решения задач газовой динамики. – М.: Наука, 1980, 352 с.
4. Мурин А. В. Математическое моделирование на параллельных системах последствий химических аварий: дис. . . . канд. физико-математических наук / ИЖГТУ. - Ижевск 2002. – 134 с.

V. M. Kolodkin

Mathematical modeling in prediction of the accident's consequences at hazardous industrial objects

The models are offered for estimating risk of hazardous industrial objects. Methods of evaluation are demonstrated on example of prediction of the consequences of chemical accidents.

Keywords: risk, accident's consequences.

Mathematical Subject Classifications: 65Q10

Колодкин Владимир Михайлович, д.т.н. профессор кафедры математического моделирования и прогнозирования Удмуртского государственного университета, 426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, д.1, т. (3412) 916-085, E-mail: Kolodkin@wing.uni.udm.ru