

Блащинская Оксана Николаевна,
магистрант, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: lin_oks@mail.ru

Кобозев Владимир Юрьевич,
старший преподаватель, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: vladimir.kobozeff@yandex.ru

Патрушев Константин Юрьевич,
доцент, Ангарский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩЕГО ВЕЩЕСТВА В ПРОСТРАНСТВЕ ОТ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ВЫБРОСА

Blaschinskaja O.N., Kobozev V.IU., Patrushev K.IU.

STUDY OF CHANGES IN THE CONCENTRATION OF A POLLUTANT IN THE SPACE OF EMISSIONS FROM A POINT SOURCE

Аннотация. Рассмотрен стандартный подход к моделированию концентрации загрязняющего вещества в системе «источник выброса – распределение загрязняющего вещества в пространстве».

Ключевые слова: категории устойчивости атмосферы, концентрация загрязняющего вещества от точечного источника выброса, шероховатость дневной поверхности, турбулентный перенос загрязняющих веществ.

Abstract. A standard approach to modeling the concentration of a pollutant in the system “emission source - distribution of pollutant in space” is considered.

Keywords: categories of atmospheric stability, concentration of a pollutant from a point source of emission, roughness of the day surface, turbulent transport of pollutants.

Размеры зоны токсической опасности при выбросах загрязняющих веществ (ЗВ) зависят как от мощности выброса, так и от характеристик атмосферного переноса, прежде всего, от скорости ветра и от категории (класса) устойчивости (стабильности) атмосферы. Категории различаются, в основном, интенсивностью вертикального перемещения.

Наиболее неустойчивая категория «А» отмечается при слабом ветре и сильной солнечной радиации, когда воздух, нагретый теплом от земной поверхности, всплывает. Обычно это состояние возникает после полудня или несколько раньше.

Категория «С» наблюдается при усилении ветра от умеренного до сильного и чаще всего вечером при ясном небе или днём при низких кучевых облаках, а также летними ясными днями при высоте солнца 15-30°.

Нейтральная категория «D» соответствует условиям сплошной облачности, как днём, так и ночью, когда влияние прямых солнечных лучей незначительно.

Устойчивые категории «E» и «F» фиксируют обычно ночью, при чистом небе или слабой облачности, когда земная поверхность выхолаживается и над ней устанавливается инверсионный слой. Естественная конвекция при этом подавляется. Стабильность повышается с ростом скорости ветра и снижением интенсивности солнечного облучения. Облачность проявляется по-разному. Ночью её снижение усиливает охлаждение Земли, наблюдается образование

температурной инверсии. Днём, наоборот, конвективные потоки и нестабильность усиливаются.

Для определения категории стабильности используют классификацию по вертикальному градиенту температур (классификация Паскуилла, таблица 1). Поскольку состояние устойчивости атмосферы, по существу, определяется интенсивностью вертикальных конвективных течений, оно может существенно изменяться и в течение суток.

Таблица 1

Классификация устойчивости по Паскуилу

Градиент температуры ($\Delta T/\Delta Z$), град/100 м	Класс устойчивости
<-1.9	А - сильная конвекция
-(1,9÷1,7)	В - конвекция
-(1,7÷1,5)	С - умеренная конвекция
-(1,5÷0,5)	Д - нейтральная
-0,5÷+1,5	Е – инверсия

Как видно, распределение состояний устойчивости атмосферы в холодное и тёплое время года весьма отличаются. Так, в холодное время года доминируют нейтральное и стабильное состояние атмосферы, а в тёплое время года: ночью – стабильное, днём – неустойчивое.

Для мощных вертикальных высокоскоростных выбросов или высокотемпературных выбросов, а также в случае расположения источника выброса на значительной высоте от поверхности земли весьма важным является учёт зависимости слоя перемешивания (приземный слой атмосферы с примерно постоянным касательным напряжением сдвига) от состояния атмосферы. По данным зарубежных исследователей высота слоя перемешивания в среднем изменяется от 100 м ночью до 2000 м в дневное время. При этом максимальное значение высоты слоя перемешивания достигается через 3-4 часа после восхода солнца.

Для описания зависимости реализации того или иного класса устойчивости атмосферы от скорости ветра U были проанализированы данные соответствующей определенной типу земной поверхности (равнинная, холмистая и т.д.).

Влияние состояния земной поверхности проявляется также и в эффекте торможения движения воздушных масс, который характеризуется, как правило, так называемым "параметром шероховатости" (D_0) в зависимости от структуры ландшафта и сезона в разрезе года. Наиболее характерные значения D_0 приведены в таблице 2.

Известно, что скорость ветра существенно изменяется с высотой [1]. В прикладных исследованиях наиболее часто используется степенная зависимость вида:

$$U(z) = U_0(z/z_0)^P, \quad (1)$$

где $U_0 = 1$ м/с – скорость ветра на высоте источника выброса; P – показатель степени, зависящий от атмосферных условий и шероховатости поверхности (0,16 – открытое пространство, 0,28 – наличие пригородной зоны, 0,4 – условия города, т.е. в условиях города турбулентность выше, чем на открытой местности); z_0 – высота источника выброса.

Значения показателя P зависят от класса устойчивости атмосферы и "шероховатости" поверхности D_0 (таблица 2).

Таблица 2

Зависимость параметра "р" от величины шероховатости

Категория стабильности атмосферы	Параметры шероховатости D_0 , м			
	0,01	0,1	1	3
A	0,05	0,08	0,17	0,27
B	0,06	0,09	0,17	0,28
C	0,06	0,11	0,2	0,31
D	0,12	0,16	0,27	0,37
E	0,34	0,32	0,38	0,47
F	0,53	0,54	0,61	0,69

Также существует связь между категориями устойчивости атмосферы и характеристиками турбулентного переноса и масштабами переноса примеси.

Анализ для простейшего случая переноса «нейтральной» примеси от точечного источника постоянной мощности G_0 показал, что распределение концентрации примеси на оси следа ($y = 0$) на поверхности земли ($z = 0$) равно:

$$\tilde{N}(x, 0, 0) \approx \frac{G_0}{2\pi \cdot U \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \quad (2)$$

Обычно коэффициенты дисперсии в горизонтальном и вертикальном направлении σ_y и σ_z вычисляются по эмпирическим соотношениям. Наиболее известны номограммы Гиффорда-Паскуилла, составленные по наблюдениям концентрации на равнинной местности:

$$\sigma_i = \exp[a_i + b_i \ln x + c_i (\ln x)^2], \quad (3)$$

где x - расстояние, м ($10^2 \leq x \leq 10^4$); $i = y; z$.

Коэффициенты аппроксимации a_i , b_i и c_i приведены в таблице 3.

Таблица 3

Константы формул, аппроксимирующих кривые Гиффорда-Паскуилла

Константы	Категории стабильности атмосферы					
	A	B	C	D	E	F
a_y	-1,104	-1,634	-2,054	-2,555	-2,754	-3,143
b_y	0,9878	1,035	1,0231	1,0423	1,0106	1,0148
c_y	-0,0076	-0,0096	-0,0076	-0,0087	-0,0064	-0,007
a_z	4,679	-1,999	-2,341	-3,186	-3,783	-4,49
b_z	-1,7172	0,8752	0,9477	1,1737	1,301	1,4024
c_z	0,277	0,0136	-0,002	-0,03116	-0,045	-0,054

Бриггс провёл аналогичные наблюдения в городской местности и поэтому его коэффициенты иногда называют «городскими». Для нестабильной атмосферы городские коэффициенты σ_y выше сельских приблизительно до 5 км, потом существенно снижаются. С учётом стабильности (для категории F) позиция превышения городских коэффициентов увеличивается до 40 км.

Представленные данные об изменениях и корреляциях между основными параметрами атмосферного переноса свидетельствуют о необходимости построения предельно чётких логических схем различных вариантов (исходов) развития аварийного процесса в атмосфере, построенных по принципу «деревьев событий».

Очевидно также, что по целому ряду характеристик (шероховатость дневной поверхности, функции распределения скорости ветра и классов стабильности атмосферы в разрезе года и др.) «функции переноса» непосредственно связаны и с «функцией источника» (давление насыщенных паров, температура воздуха и поверхности грунта и др.), то есть с мощностью выброса.

В настоящее время сформировался «стандартный подход» к моделированию концентрации ЗВ в системе «источник выброса – концентрация ЗВ на различных расстояниях от источника выброса» [1-3]. Он опирается на то, что между основными параметрами атмосферного переноса загрязняющих веществ, или «функцией переноса» и «функцией источника» существует тесная связь [4].

С использованием классических законов сохранения количества движения, массы и неразрывности можно получить для вертикального выброса следующие выражения для расчёта концентрации ЗВ в расширяющейся струе на высоте z от среза трубы радиусом r_0 :

$$C = \frac{C_0 \cdot \frac{r_0}{2\alpha} \sqrt{\frac{p_0}{p_a}}}{z + r_0 / (2\alpha)}, \quad (4)$$

а также «предельную» высоту подъёма струи – Z_* , на которой её средняя по сечению скорость будет близка к скорости ветра на этой же высоте – $U(Z_*) \equiv U_*$:

$$Z_* = [r_0/(2\alpha)] \cdot \left[\sqrt{\frac{p_0}{p_a}} \cdot \frac{W_0}{U_*} - 1 \right], \quad (5)$$

где C_0 ; p_0 – концентрация ЗВ и плотность газа (смеси) на срезе; p_a – плотность атмосферного воздуха; α – коэффициент «захвата» (эжекции) воздуха (в соответствии с многочисленными экспериментами для свободной турбулентной струи $\alpha \cong 0,06 \div 0,08$); W_0 – скорость выброса.

На высоте $Z = Z_*$ струя практически погасит свою исходную кинетическую энергию, и дальнейший процесс рассеивания примеси будет подчиняться законам турбулентного обмена в атмосфере, то есть произойдёт смена эжекционного механизма на диффузионный.

Определив значения $Z_* = H_{эк}$ и $C(Z_*)$, где по смыслу $H_{эк}$ является высотой эквивалентного источника с помощью загрязняющего вещества Q_* , можно перейти ко второй стадии анализа – к расчёту рассеивания по направлению ветра ЗВ в атмосфере под действием массопереноса и турбулентной диффузии.

Для прогноза распределения концентраций ЗВ вокруг источника используют простейшую модель Гаусса турбулентной диффузии [2, 4-6].

Математическое выражение для концентрации вещества от точечного источника с постоянной мощностью – Q_* (кг/с) записывается в виде:

$$C(x, y, z, t) = \frac{f(A) \cdot Q_*}{2\pi\sigma_y\sigma_z U} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right], \quad (6)$$

где Q_* – мощность источника (кг/сек); σ_y и σ_z – дисперсионные параметры, зависящие от устойчивости атмосферы и расстояния от источника x , (м); H – высота источника (м); x, y, z – осевая, поперечная и вертикальная координаты; $f(A)$ – доля примеси в слое перемешивания; A – высота слоя перемешивания – в этом слое нет растительности.

Эта зависимость применительно к реальным условиям выброса с концентрацией C_0 корректируются введением понятия виртуального источника.

В этом случае вычисляют x_0 таким образом, что в точке ($x = 0, y = 0, z = H$) соблюдалось равенство:

$$C_0 = \frac{f(A) \cdot Q}{2\pi \cdot U \cdot \sigma_y(x_0) \cdot \sigma_x(x_0)}. \quad (7)$$

При дальнейших расчётах параметры дисперсии корректируются с учётом значения x_0 , то есть $\sigma_y = \sigma_y(x + x_0)$; $\sigma_z = \sigma_z(x + x_0)$.

Как правило, для относительно небольших значений высот подъёма факела ($H < 100 \div 200$ м) $f(A) = 1$.

В заключение можно сделать следующий вывод: сложность учёта и описания в моделях процессов турбулентного переноса загрязняющих веществ, при наличии в атмосфере крупномасштабных упорядоченных нестационарных образований (больших вихрей) и упорядоченной составляющей сравнительно мелкомасштабной турбулентности, обусловлены нестационарностью самого

процесса и отсутствием универсального кинетического уравнения, аналогичного уравнению Больцмана в динамике разряженных газов [7, 8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бадалян Л.Х. Особенности естественных циклов на урбанизированных территориях // Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда и окружающей среды. 2006. № 10. С. 186-188.

2. Блащинская О.Н., Горбунова О.В., Асламова В.С., Забуга Г.А., Адсорбция диоксида серы поверхностью пространственных барьеров // Сб. науч. труд. IV Всероссийская конф. «Винеровские чтения». Т.2. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2011. С. 26-34.

3. Добросельский К.Г. Модель оценки рассеяния газообразных вредных веществ от вертикальных сосредоточенных источников // Безопасность жизнедеятельности. 2012. №1. С. 25-29.

4. Замышляев Б.В. Влияние начальных размеров выброса (истечения) невесомой примеси на оценку концентрационных полей, возникающих при распространении облака гауссова типа // Проблемы безопасности и ЧС. 2004. №4. С. 35-42.

5. Блащинская О.Н. Расчёт концентрации диоксида серы с помощью барометрической модели с учётом влияния барьера растительности // Вестник КрасГАУ. 2012. №7. С. 70-74.

6. Блащинская О.Н. Влияние пространственного барьера растительности на концентрацию поллютантов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2012. №4. С.73-82.

7. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. – М.: Наука, 1984.

8. Махутов Н.А. Методы и моделирование процессов возникновения и развития техногенных катастроф // Проблемы безопасности и ЧС. 2009. №2. С. 3 –23.