

**Блащинская Оксана Николаевна**,  
преподаватель кафедры «Автоматизации технологических процессов»,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail: lin\_oks@mail.ru

**Патрушев Константин Юрьевич**,  
доцент, Ангарский государственный технический университет

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЙВАНИЯ ВЫБРОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ИХ АДсорбЦИИ БАРЬЕРОМ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА**

**Blashinskaya O.N., Patrushev K.IU.**

## **MODELING OF THE DISPERSION OF THE RELEASE OF POLLUTANTS, TAKING INTO ACCOUNT THE EFFECT OF THEIR ADSORPTION BY THE VEGETATION BARRIER**

**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 pollutants in the system "emission source-distribution of pollutants in space" is considered.

**Keyword:** categories of atmospheric stability, concentration of pollutants from a point source of emission, roughness of the daytime surface, turbulent transport of pollutants.

Размеры зоны токсической опасности при выбросах токсиканта 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 ин-

тенсивности солнечного облучения. Облачность проявляется по-разному. Ночью её снижение усиливает охлаждение Земли, образование температурной инверсии. Днём, наоборот, конвективные потоки и неустойчивость 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

Классы устойчивости по Паскуилу

Градиент температуры ( $\Delta T/\Delta Z$ ), °C/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, а 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 определенному 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  $D_0$  даны в таблице 2.

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

$$U(z) = U_0 \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)^p, \quad (1)$$

где  $U_0 = 1 \text{ м/с}$  – 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, м.

Значения показателя « $p$ » также зависят от класса устойчивости атмосферы и "шероховатости" поверхности  $D_0$  (таблица 2).

Таблица 2

Зависимость параметра "p" 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:

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

Обычно коэффициенты дисперсии в горизонтальном и вертикальном направлении  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  вычисляют по эмпирическим соотношениям. Наиболее известны номограммы «Гиффорда-Паскуилла», составленные по наблюдениям концентрации на равнинной местности:

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

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

Коэффициенты аппроксимации  $a_i$ ,  $b_i$  и  $c_i$ , даны 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  $\sigma_y$  выше сельских приблизительно до 5 км, потом существенно снижаются. С учётом стабильности (для категории F) позиция превышения городских коэффициентов увеличивается до 40 км. Расхождение коэффициентов ( $\sigma_z$  ещё более существенны).

Представленные выше 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.

Проиллюстрируем важность обоснования характерного сценария на примере аварийного струевого выброса токсического газа с постоянной мощностью. Возможная неопределённость - направление выброса. Варианты: 1 – вертикальная свободная струя в сносящем потоке ветра; 2 - «настильная» струя (то есть ориентированная вдоль земной поверхности) с характерной высотой источника - 1,0 м. Для корректности сравнения диаметр источника и масса выброса в обоих случаях приняты одинаковыми.

В настоящее время сформировался «стандартный подход» к моделированию концентрации загрязняющих веществ (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 «функций переноса» и «функций источника» существует тесная связь [4].

С использованием классических законов сохранения количества движения, массы и неразрывности можно получить для вертикального выброса сле-

дующие выражения для расчёта концентрации токсиканта в расширяющейся струе на высоте «z» от среза трубы радиусом «r<sub>0</sub>»:

$$C = \frac{C_0 \cdot r_0 \cdot \sqrt{\frac{r_0}{r_a}}}{2 \cdot z \cdot a + r_0}, \quad (4)$$

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\*) ≡ U\*:

$$Z^* = \frac{r_0}{2 \cdot a} \cdot \left( \sqrt{\frac{p_0}{p_a} \cdot \frac{w_0}{U^*}} - 1 \right), \quad (5)$$

где C<sub>0</sub>; p<sub>0</sub> – концентрация токсиканта и плотность газа (смеси) на срезе; p<sub>a</sub> – плотность атмосферного воздуха; a – коэффициент «захвата» (эжекции) воздуха (в соответствии с многочисленными экспериментами для свободной турбулентной струи, a = 0,06 ÷ 0,08); w<sub>0</sub> – 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 инжекционного механизма на диффузионный.

Определив значения Z\* = H<sub>эк</sub> и C(Z\*), где по смыслу H<sub>эк</sub> является высотой эквивалентного источника с помощью токсиканта Q\* можно перейти ко второй стадии анализа - к расчёту рассеивания по направлению ветра токсиканта 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 следующем виде:

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

где Q\* – мощность источника (кг/с); σ<sub>y</sub> и σ<sub>z</sub>, - дисперсионные параметры, зависящие от устойчивости атмосферы и расстояния от источника «x», (м); U - скорость ветра м/с; H - высота источника (м); x, y, z - осевая, поперечная и вертикальная координаты; f(A) - доля примеси в слое перемешивания («A» - высота слоя перемешивания).

Эта зависимость применительно к реальным условиям выброса с концентрацией C<sub>0</sub> корректируются введением понятия виртуального источника. В этом случае вычисляют x<sub>0</sub> таким образом, что в точке (x = 0, y = 0, z = H) соблюдалось равенство:

$$C = \frac{f(A) \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y(x_0) \cdot \sigma_z(x_0) \cdot U} \quad (7)$$

А 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 заключении 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 / Л.Х. Бадалян // Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда и окружающей среды. – 2006. – № 10. – С. 186-188.
2. **Блащинская, О.Н.** Адсорбция диоксида серы поверхностью пространственных барьеров / О.Н. Блащинская, О.В. Горбунова, В.С. Асламова, Г.А. Забуга, Л.Н. Сторожева // 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 / К.Г. Добросельский // 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 / Б.В. Замышляев // 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 / О.Н. Блащинская, О.В. Горбунова, Г.А. Забуга, В.С. Асламова, Л.Н. Сторожева // Вестник КрасГАУ. – 2012. – №7. – С. 70-74.
6. **Блащинская, О.Н.** Влияние пространственного барьера растительности на концентрацию поллютантов / О.Н. Блащинская, О.В. Горбунова, Г.А. Забуга, В.С. Асламова, Л.Н. Сторожева // 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 / Н.А. Махутов, В.П. Петров, Р.С. Ахметханов, Е.Ф. Дубинин, Т.Н. Дворецкая // Проблемы безопасности и ЧС. – 2009. – №2. – С. 3 –23.