

УДК 502.1: 504

Блащинская Оксана Николаевна,
старший преподаватель кафедры «Автоматизация технологических процессов»
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: Lin_oks@mail.ru

Кобозев Владимир Юрьевич,
старший преподаватель кафедры «Автоматизация технологических процессов»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail:
kobozeff.vladimir@ya.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЙВАНИЯ ВЫБРОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ И ИЗМЕНЕНИЕ ИХ КОНЦЕНТРАЦИИ В АТМОСФЕРЕ

Blaschinskaj O.N., Kobozev V.Iu.

MODELING THE DISPERSION OF POLLUTANTS AND CHANGES IN THEIR CONCENTRATION IN THE ATMOSPHERE

Аннотация. В статье рассмотрено моделирование рассеивания загрязняющего вещества при выбросах токсиканта, которое зависит от характеристик атмосферного переноса, то есть от скорости ветра и класса устойчивости (стабильности) атмосферы.

Ключевые слова: моделирование, загрязняющие вещества, класс устойчивости атмосферы, мощность выброса загрязняющих веществ.

Abstract. The article considers the modeling of the dispersion of a pollutant during toxicant emissions, which depends on the characteristics of atmospheric transport, that is, on wind speed and the stability class of the atmosphere.

Keywords: modeling, pollutants, the stability class of the atmosphere, the emission power 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 [1, 2]. 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 «Е» 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, образование температурной инверсии. Днём, наоборот, конвективные потоки и неустойчивость усиливаются.

Для определения категории стабильности используют классификацию по вертикальному повислой 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. Характерное распределение стабильности атмосферы в течение дня средних широт представлено для различных времён года. 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 распо-

ложения 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.

Таблица 1 – Классификация классов устойчивости по Паскуиллу

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

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 ис-

пользуется степенная зависимость вида:

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

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

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:

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

Таблица 2 – Зависимость параметра «р» от величины шероховатости

Категория стабильности атмосферы	Параметры шероховатости D_0 , м			
	0,01	0,1	1	3
А	0,05	0,08	0,17	0,27
В	0,06	0,09	0,17	0,28
С	0,06	0,11	0,2	0,31
Д	0,12	0,16	0,27	0,37
Е	0,34	0,32	0,38	0,47
Ф	0,53	0,54	0,61	0,69

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

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

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					
	А	В	С	Д	Е	Ф
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 снижа-

ются. С учётом стабильности (для категории «F») позиция превышения городских коэффициентов увеличивается до 40 км. Расхождения коэффициентов σ_z ещё более существенны.

Представленные выше данные об изменении 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.

С использованием классических законов сохранения количества движения, массы и неразрывности можно получить для вертикального выброса следующие выражения для расчёта концентрации токсиканта в расширяющейся струе на высоте «z» от среза трубы радиусом «r₀»:

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

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*:

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

где C₀; p₀ – концентрация токсиканта и плотность газа (смеси) на срезе; p_a – плотность атмосферного воздуха; a – коэффициент «за-

хвата» (эжекции) воздуха (в соответствии с многочисленными экспериментами для свободной турбулентной струи, a = 0,06 ÷ 0,08); w₀ – 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_{эк} и C(Z*), где по смыслу H_{эк} 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 токсиканта вокруг источника используют простейшую модель Гаусса турбулентной диффузии.

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

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

где Q* – мощность источника (кг/с); σ_y и σ_z, – 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 C₀ корректируется введением понятия виртуального источника. В этом случае вычисляют x₀ таким образом, чтобы в точке (x = 0, y = 0, z = H) соблюдалось равенство:

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

При дальнейших расчётах параметры дисперсии корректируются с учётом значения x₀, то есть σ_y = σ_y(x + x₀); σ_z = σ_z(x + x₀). Как правило, для относительно небольших значений высот подъёма факела (H < 100 ÷ 200 м) f(A) = 1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Е.И., Прусаков В.М., Душутин К.К. Охрана атмосферы и нефтехимия. Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 231 с.
2. Замышляев Б.В. Влияние начальных размеров выброса (истечения) невесо-

мой примеси на оценку концентрационных полей, возникающих при распространении облака гауссова типа // Проблемы безопасности и ЧС. 2004. №4. С. 35–42.

УДК 621.3.084.2

*к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: candell@mail.ru*

Мазур Владимир Геннадьевич,

к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника», ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

Пильцов Михаил Владимирович,

к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

e-mail: mpilcov@yandex.ru

Пудалов Алексей Дмитриевич,

к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника», ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

e-mail: puddim@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТЬЮ ВОЗДУХА И ВЛАЖНОСТЬЮ ЗЕРНА

Voronova T.S., Mazur V.G., Piltsov M.V., Poudalov A.D.

DETERMINATION OF THE QUANTITATIVE RELATIONSHIP BETWEEN RELATIVE AIR HUMIDITY AND GRAIN MOISTURE

Аннотация. Предложен способ измерения влажности зерна сорбционными гигрометрами, работающими на сорбционно-частотном или сорбционно-ёмкостном методе измерений. Проведены экспериментальные исследования, показывающие, что влажность зерна и влажность воздуха над поверхностью зерна взаимосвязаны при условии поддержания заданной температуры. Получена эмпирическая зависимость массовой доли влаги пшеницы от относительной влажности воздуха.

Ключевые слова: влажность, зерно, влагомер, гигрометр.

Abstract. A method is proposed for measuring grain moisture content with sorption hygrometers operating on the sorption-frequency or sorption-capacitance measurement method. Experimental studies have been carried out showing that grain moisture and air humidity above the surface of the grain are interrelated, provided that a given temperature is maintained. An empirical dependence of the mass fraction of moisture in wheat on relative air humidity was obtained.

Keywords: humidity, grain, moisture meter, hygrometer.

Содержание влаги во многих видах продукции является одним из важнейших показателей качества [1-3]. Большое значение это также имеет и при обработке и хранении большинства видов сельскохозяйственной продукции. В частности, для сохранения потребительских свойств, предъявляются высокие требования по влагосодержанию зерна [4]. Влага оказывает влияние не только на качественное состояние самого

зерна, но и на жизнедеятельность микроорганизмов, находящихся на его поверхности.

При превышении влажности зерна выше нормированных значений усиливаются физико-химические процессы, активируется ферментация, происходит быстрое размножение микроорганизмов и грибков. Если при хранении зерна влажность превышает установленные нормы, то это приводит к потере пищевых качеств продукта, а также к сниже-