

УДК 51-74

## Аспекты практического применения нормативного метода расчета распространения примесей в атмосфере для оценки приземных концентраций в условиях города

А.Р. Шагидуллин <sup>1</sup>, Ю.А. Тунакова <sup>2</sup>, Р.Р. Шагидуллин <sup>1</sup>

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ <sup>1</sup>, Казанский  
национальный исследовательский технический университет им. А.Н.  
Туполева – КАИ <sup>2</sup>

*Аннотация:* Моделирование распространения примесей имеет крайне важное значения для вопросов управления качеством окружающей среды. В РФ наиболее широко применяется метод расчета ОНД-86, основанный на решении уравнения атмосферной диффузии. В статье приводятся результаты расчета приземных концентраций для города Казани. Проводится сравнение с экспериментальными значениями. Анализируются аспекты применения методики в аналитических целях.

*Ключевые слова:* уравнение диффузии, турбулентная диффузия, расчет загрязнения, загрязнение атмосферы, атмосферные примеси, приземные концентрации

Решение задачи распространения примеси в общем случае возможно с помощью дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} k_i \frac{\partial q}{\partial x_i} - \alpha q \quad (1)$$

Уравнение (1) называют уравнением атмосферной диффузии. Оно описывает изменение во времени концентрации примеси  $q$  под действием ветра, турбулентности и химических превращений. При дальнейшем рассмотрении частных случаев уравнения (1) координаты  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) обозначаются как  $x, y, z$ . Переменными  $u_i$  обозначаются составляющие средней скорости ветра вдоль трех осей. Далее используются записи  $u_1 = u, u_2 = v, u_3 = w$ . Переменными  $k_i$  обозначаются коэффициенты обмена (далее  $k_x, k_y, k_z$ ). Коэффициент  $\alpha$  описывает изменение примеси за счет трансформации в другие вещества.

Для решения практических задач необходимо упростить уравнение (1). Если расположить ось  $x$  вдоль направления ветра, то скорость перемещения примесей вдоль перпендикулярной ей оси  $y$  принимает значение  $v = 0$ . Если мы рассматриваем легкую мелкодисперсную примесь или газ, не оседающие в воздухе под действием силы тяжести, то значение также принимает значение  $w = 0$ .

Если мы рассматриваем перемещение примеси под действием ветра вдоль оси  $x$ , то коэффициентом обмена  $k_x$ , характеризующим диффузию примеси вдоль оси  $x$ , можно пренебречь, так как диффузионное движение в этом направлении значительно менее значимо по сравнению конвективным. Это наглядно можно

увидеть, если наблюдать распространение дыма от труб при наличие ветра: дым практически не распространяется против направления ветра [1].

Слагаемое  $\frac{\partial q}{\partial t}$  в выражении (1) характеризует скорость изменения концентрации примеси во времени. Однако если рассматривать установившийся процесс рассеивания примеси, то изменение ее концентрации во времени носит квазистационарный процесс. Тогда в выражении (1) можно для большинства практических случаев принять  $\frac{\partial q}{\partial t} = 0$ .

Далее, если ограничиться рассмотрением примеси, не подвергающейся химической трансформации, то коэффициент  $a$  также принимает значение  $a = 0$ .

С учетом сделанных предположений, уравнение (1) принимает упрощенный вид:

$$u \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} . \quad (2)$$

Для решения этого уравнения необходимо конкретизировать зависимость переменных от координат. Как известно, на характер движения воздушных масс оказывает влияние подстилающая поверхность, таким образом скорость перемещения примеси и коэффициенты обмена взаимосвязаны и являются функцией координаты  $z$  [2]. Если конкретизировать эту зависимость, то для источника с массой выбросов  $M$  и высотой  $H$  можно получить решение в виде [1]:

$$q = \frac{M}{2(1+n)k_1\sqrt{\pi k_0 x^3}} e^{-\frac{u_1 H^{1+n}}{(1+n)^2 k_1 x} \frac{y^2}{4k_0 x}} . \quad (3)$$

Из выражения (3) для концентрации следует, что при  $y=0$ , т.е. по направлению ветра вдоль оси  $x$ , концентрация имеет максимум на некотором расстоянии от источника. Эта максимальная концентрация, которую может создавать источник при текущей мощности выброса  $M$ , обозначается  $q_m$ , а расстояние, на котором оно формируется –  $x_m$ . Эти величины находятся из условия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial x} &= \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \\ q_m &= \frac{0,116(1+n)^2 M}{u_1 H^{1.5(1+n)}} \sqrt{\frac{k_1}{k_0 u_1}} \\ x_m &= \frac{2}{3} \frac{u_1 H^{1+n}}{k_1 (1+n)^2} \end{aligned}$$

В реальных условиях на рассеивание примеси оказывают влияние пульсации ветра. Как указывается в [1], вычисленные по приведенным выше выражениям концентрации согласуются с экспериментальными значениями при малом времени отбора проб (2-3 мин) и на сравнительно малых расстояниях от источника. При более продолжительных отборах проб воздуха необходимо осреднение концентрации с учетом пульсации направления ветра вокруг среднего значения.

На практике нормирование выбросов проводится по максимальным концентрациям примесей, отнесенным к 20-30 минутному интервалу времени. Для этого же времени воздействия устанавливаются максимальные разовые предельно допустимые концентрации (ПДК<sub>м.р.</sub>) и проводится отбор проб воздуха.

Вероятность  $\omega(\varphi)$  отклонения ветра на угол  $\varphi$  от среднего за время  $T$  значения при дисперсии  $\varphi_0$  можно принять в виде выражения [1]:

$$\omega(\varphi) = \frac{1}{\varphi_0 \sqrt{2\pi}} e^{\frac{-\varphi^2}{2\varphi_0^2}}.$$

Тогда для концентрации можно прийти к выражению:

$$\bar{q} = \frac{M}{(1+n)k_1\varphi_0x^2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{u_1H^{1+n}}{k_1(1+n)^2x} - \frac{y^2}{2\varphi_0^2x^2}}.$$

Указанные соображения коллективом исследователей Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО им. А.И. Воейкова) положены в основу широко известной методики расчета распространения примесей в атмосфере ОНД-86 [3], разработанной для применения в практических целях. Эта методика в настоящее время является утвержденной и единственной применяемой в РФ в целях нормирования.

Расчеты рассеивания примесей широко применяются при проектировании объектов, оказывающих негативное воздействие на атмосферный воздух, при разработке проектной разрешительной документации, планировании природоохранных мероприятий и т.д.

В практических расчетах для расчета максимальной приземной концентрации от источника при заданных параметрах и мощности выброса используется выражение [3]:

$$C_m = \frac{AMFm\eta}{H^2\sqrt[3]{V_1\Delta T}}. \quad (4)$$

В представленном выражении  $A$  – коэффициент температурной стратификации атмосферы,  $F$  – безразмерный коэффициент оседания примесей ( $F = 1-3$ ),  $\eta$  – коэффициент рельефа,  $V_1$  – расход газовой смеси, выбрасываемой из источника загрязнения,  $\Delta T$  – разница температуры окружающей среды и температуры выбрасываемой примеси, коэффициенты  $m$  и  $n$  рассчитываются в зависимости от параметров выхода газовой смеси из источника.

Расстояние от источника вдоль направления ветра до точки формирования максимальной концентрации примеси рассчитывается по формуле:

$$x_m = \frac{5 - F}{4} dH$$

Коэффициент  $d$  в выражении выше рассчитывается в зависимости от параметров выброса газовой смеси.

При проведении расчетов на основе значения  $C_m$  (4) по приведенным в [3] формулам вычисляются концентрации примесей вдоль оси факела на расстояниях  $x$ , отличных от  $x_m$ , и в перпендикулярных к оси факела расстояниях. Концентрации, полученные от различных источников суммируются. Для определения максимальной разовой концентрации расчеты проводятся с перебором направлений ветра по кругу и скоростей ветра в интервале от 0,5 м/с до скорости, не превышаемой в данной местности в 95% случаев. На практике, для вычислений, в силу их громоздкости используются специализированные программы расчета загрязнения атмосферы. Эти программы согласуются ГГО им. А.И.Воейкова на предмет соответствия методике ОНД-86.

Представленные выражения справедливы для наиболее часто наблюдаемых метеорологических условий. Однако существуют так называемые аномальные метеорологические условия, которые требуют несколько иного подхода к решению уравнения диффузии.

К таковым относится штиль. Как указывалось выше, при решении уравнения для случая наличия ветра пренебрегается коэффициентом обмена вдоль оси  $x$ . Таким образом, полученные выражения не применимы к случаю штиля.

К аномальным условиям, способствующим росту приземных концентраций загрязняющих веществ, относится возникновение приподнятой инверсии температуры. При возникновении инверсии меняется характер движения воздушных масс, и как следствие нарушается обычная зависимость коэффициентов обмена и скорости движения воздушных масс от высоты. Таким образом, решение уравнения диффузии, полученное на основе принятых зависимостей переменных уравнения (2) от координат, не справедливо для случая инверсии температуры.

К аномальным условиям, способствующим повышению уровня загрязнения атмосферы, относят также туманы. Влияние туманов на уровень загрязнения носит сложный характер. Примеси могут частично поглощаться каплями воды и в результате химических реакций могут образовываться новые вещества. Таким образом, решение уравнения диффузии в этом случае должно производиться с учетом коэффициента  $a$ . Отдельного внимания заслуживает смог, как результат взаимодействия тумана и дыма, а также фотохимический смог, образующийся в отсутствие тумана в случаях значительного загрязнения атмосферного воздуха.

Таким образом, методика ОНД-86 не может применяться для оценки концентраций при упомянутых выше неблагоприятных метеорологических условиях (НМУ), способствующих накоплению примесей в приземном слое воздуха. Однако, в практике государственного управления деятельностью хозяйствующих субъектов, имеющих источники загрязнения атмосферного воздуха, учитывается, что при возникновении НМУ могут многократно увеличиваться уровни загрязнения. При наступлении НМУ для предприятий формируются предупреждения, получив которые они должны снизить выбросы в атмосферный воздух в соответствии со специально разработанными планами.

Адекватность расчетной модели оценивается путем сопоставления рассчитанных значений с установленными экспериментальным способом. Причем в условиях города расчет загрязнения атмосферного воздуха требует создания сводных

баз данных параметров выбросов стационарных и передвижных источников загрязнения атмосферного.

Для расчёта приземных концентраций загрязняющих веществ использовалась сводная база данных параметров выбросов загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников г. Казани, созданная в 2015 г. База включает данные о выбросах более 10 тыс. стационарных источников загрязнения 269 наиболее значимых предприятий города, принятые по утвержденным материалам инвентаризации предприятий. В базе также учтены выбросы автотранспорта, движущегося по 573 наиболее значимым участкам автодорог, общая протяженность которых составила 400 км. Выбросы автотранспорта рассчитаны по [4]. Для определения максимального негативного воздействия выбросов автотранспорта учитывались параметры транспортных потоков, определенные в периоды максимальной транспортной нагрузки.

Для сравнения с результатами экспериментального определения уровня загрязнения воздуха приземные концентрации примесей рассчитывались в точках расположения автоматических станций контроля загрязнения атмосферы Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан. Расчеты проводились с использованием УПРЗА «Эколог-Город», вер. 3, разработанной ООО «Фирма «Интеграл». Станции контроля проводят измерения в автоматическом режиме фиксируя значение концентрации каждые 20 минут 24 часа в сутки. Сравнение производилось с результатами измерений за 2015 год оксида азота и оксида углерода, которые относятся к основным загрязняющим веществам [5]. Для проведения сравнения массивы экспериментальных концентраций были предварительно обработаны с исключением из рассмотрения периодов сбоев в работе станций.

Сравнение рассчитанных и экспериментальных значений приводится в таблице 1.

*Таблица 1*

Сравнение рассчитанных и вычисленных максимальных приземных концентраций

Станция контроля	Оксид азота			Оксид углерода		
	Расчет, мг/м <sup>3</sup>	Эксперимент, мг/м <sup>3</sup>	Расхождение, %	Расчет, мг/м <sup>3</sup>	Эксперимент, мг/м <sup>3</sup>	Расхождение, %
АСКЗА-1	0,088	0,088	0	2,9	1,2	-59
АСКЗА-2	0,152	0,24	58	3,25	2	-38
АСКЗА-3	0,084	0,144	71	1,2	1,75	46
АСКЗА-4	0,076	0,084	11	1,7	3	76

Расчитанные описанным выше способом значения по своей сути являются расчетным аналогом не какого-либо актуального значения концентрации, а статистической величины – результата анализа ряда концентраций, измеренных за определенный период времени (в нашем случае анализируется годовой интервал измерений). Сказанное является следствием представленных ниже обстоятельств.

Сводная база данных параметров выбросов создана на основе результатов инвентаризаций выбросов предприятий, которые проводились для установления предельно допустимых выбросов – нормативов воздействия, устанавливающих предельный допустимый уровень негативного воздействия предприятий на

атмосферный воздух. Созданная таким образом база данных параметров выбросов стационарных источников, соответственно, отражает одновременную работу всех предприятий на режимах, связанных с максимальными выбросами в атмосферный воздух. База данных передвижных источников также отражает режим максимального воздействия выхлопных газов автомобилей, так как в основе расчета их выбросов лежит исследование характеристик автотранспортных потоков при максимальной транспортной загрузке.

Кроме того, расчеты приземных концентраций для каждой точки проводились с перебором всех возможных сочетаний направлений и скоростей ветра для определения наиболее неблагоприятных метеоусловий в пределах определенной климатической нормы. (т.е. исключая упоминавшийся выше аномальные метеорологические условия, способствующие накоплению загрязняющих веществ в атмосфере).

С учетом сказанного, для сравнения с рассчитанными концентрациями определялся 98-й перцентиль ряда экспериментальных концентраций для каждого вещества на каждой станции [2]. Статистическая обработка ряда измеренных концентраций необходима для определения соответствующей экспериментальной концентрации, которая отражает максимальный уровень загрязнения атмосферы за исключением периодов НМУ.

Полученные в таблице 1 расхождения рассчитанных и экспериментальных концентраций связаны с двумя факторами: ограниченностью периода наблюдений, принятого для проведения сравнения, а также неточностью исходных данных, а именно погрешностью проведения инвентаризации выбросов.

Не смотря на довольно значительные абсолютные отклонения рассчитанных и измеренных концентраций (табл. 1), которые могут составлять еще более значимые величины при оценке концентраций специфических веществ, сводные расчеты загрязнения атмосферного воздуха, в основе которых лежит модель расчета распространения примесей на основе уравнения атмосферной диффузии, являются на сегодняшний день наиболее комплексным инструментом моделирования загрязнения атмосферного воздуха, обеспечивающим широкие возможности для проведения различных исследовательских работ или работ по управлению качеством атмосферного воздуха. Сказанное подтверждается тем, что в настоящее время проводится активное обсуждение законопроекта по включению понятия сводные расчеты и правил их осуществления в природоохранное законодательство.

## **Литература**

1. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
2. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
3. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. 93 с.

4. Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов. Санкт-Петербург: ОАО «НИИ Атмосфера», 2010. 15 с.
5. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. М.: Государственный комитет СССР по гидрометеорологии, Министерство здравоохранения СССР, 1991. 573 с.

MSC 92F05

## **Aspects of the practical application of standard method of calculation of atmospheric dispersion for estimation the ground level concentrations in the city**

A.R. Shagidullin <sup>1</sup>, J.A. Tunakova <sup>2</sup>, R.R. Shagidullin <sup>1</sup>

Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences <sup>1</sup>, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI <sup>2</sup>

*Abstract:* Calculation of atmospheric dispersion is extremely important for the quality of the environment. The most widely used method of calculating in Russia are based on the solution of the equation of atmospheric diffusion. The article presents the results of calculation of ground level concentrations for the city of Kazan and results of comparison these concentrations with experimental values. Discusses the application of the method for analytical purposes.

*Key words:* diffusion equation, turbulent diffusion, calculation of pollution, air pollution, atmospheric pollutants, ground-level concentrations.

### **References**

1. Berlyand M.E. Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery [Prediction and regulation of air pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 272 p.
2. Berlyand M.E. Sovremennye problemy atmosfernoj diffuzii i zagryazneniya atmosfery [Modern problems of atmospheric diffusion and atmospheric pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975. 448 p.
3. Metodika rascheta koncentracij v atmosfernom vozduhe vrednyh veshchestv, sodержashchihsya v vybrosah predpriyatij [The method of calculation of concentrations in atmospheric air of harmful substances contained in emissions of enterprises]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 93 p.
4. Metodika opredeleniya vybrosov avtotransporta dlya provedeniya svodnyh raschetov zagryazneniya atmosfery gorodov [Method of estimation of emissions of vehicles for the summary calculation of air pollution in cities]. St. Petersburg: OAO "NII Atmospere", 2010. 15 p.
5. RD 52.04.186-89. Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery [Manual control of air pollution]. M.: Gosudarstvennyj komitet SSSR po gidrometeorologii, Ministerstvo zdavoohraneniya SSSR, 1991. 573 p.