

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В РЕШЕНИИ ВОЗДУХООХРАННЫХ ЗАДАЧ ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

Н.Н. Безуглова, Ю.А. Суковатов, К.Ю. Суковатов, И.А. Суторихин

В работе рассматривается универсальная 3-х мерная нестационарная модель для расчета распространения примеси и выпадения её на подстилающую поверхность. Приводятся результаты расчетов выпадения примеси в снег за зимний период и сравнение их с имеющимися экспериментальными данными.

Скоординированное развитие территории, в частности, её промышленной и социальной инфраструктуры, требует одновременного рассмотрения множества данных и взаимозависимостей, имеющих характер ресурсных потребностей, загрязнения среды, социально-экономических эффектов и т.д. Конкретным примером может служить необходимость учета закономерностей распространения атмосферных загрязнений на территории, включающей проектируемые и существующие промышленные объекты как источники загрязнений [1].

Вопросы характера распространения загрязняющих веществ в атмосфере и их выпадения на подстилающую поверхность представляют в настоящее время большой интерес. Для решения многих хозяйственных и экологических задач требуется знание уровней загрязнения в пограничном слое атмосферы. Специфика задачи состоит в том, что пограничный слой атмосферы является средой, постоянно меняющейся во времени и пространстве. При исследовании процессов распространения и седиментации загрязняющих веществ необходимо учитывать стратификацию метеорологических параметров в пограничном слое атмосферы в различные периоды времени, многообразие свойств подстилающей поверхности, характеристики источника выбросов и некоторые другие параметры. Поэтому наряду с наблюдениями за уровнями загрязнения атмосферы и выбросами загрязняющих веществ моделирование является важной составной частью экологического мониторинга.

Процесс распространения примеси в атмосфере происходит за счет адвективного переноса воздушными массами и диффузии, обусловленной турбулентными пульсациями воздуха. Если примесь состоит из крупных частиц, то частицы под действием силы тяжести начинают спускаться с определенной

постоянной скоростью, по закону Стокса. Естественно, что почти все примеси в конечном итоге осаждаются на поверхность земли, причем, тяжелые осаждаются в основном под действием гравитационного поля, а легкие – в результате диффузионного процесса. Наряду с мелкомасштабной диффузией, размывающей факелы примеси, большое значение в теории распространения загрязнений имеют флуктуации скорости и направления ветра за длительный период времени. За большой период времени воздушные массы, подхватывающие примеси от источника, многократно меняют направление и скорость. Статистически такие многолетние изменения описываются специальной диаграммой, называемой розой ветров, в которой величина вектора скорости пропорциональна числу повторяющихся событий, связанных с движением воздушных масс, распространяющихся в данном направлении. Таким образом, максимумы диаграммы розы ветров соответствуют господствующим в данном районе ветрам [2].

В настоящей работе предлагается простая универсальная трехмерная нестационарная модель для расчета переноса примеси в атмосфере и выпадения ее на подстилающую поверхность. Модель основана на решении полуэмпирического уравнения адвекции-диффузии примеси:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial s}{\partial z} + bs - \frac{\partial}{\partial t} k \frac{\partial s}{\partial z} - \mu_x \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - \mu_y \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = s_0(\vec{r}, t), \quad (1)$$

где s - концентрация примеси, u, v, w - компоненты скорости, w_g - скорость гравитационного оседания примеси, b - коэффициент поглощения примеси, k - вертикальный коэффициент турбулентной диффузии, μ_x, μ_y - горизонтальные коэффициенты турбулентной

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В РЕШЕНИИ ВОЗДУХООХРАННЫХ ЗАДАЧ ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

диффузии, $s_0(\vec{r}, t)$ - источник загрязняющих веществ. Граничные условия для примеси следующие:

$$z = h, \quad k \frac{\partial s}{\partial z} = 0,$$

$$x, y = d, \quad \mu_x \frac{\partial s}{\partial x} = 0, \quad \mu_y \frac{\partial s}{\partial y} = 0,$$

где h - высота области распространения примеси, d - ее горизонтальный размер. Особо следует остановиться на нижнем граничном условии для примесей, которое имеет вид:

$$z = z_1, \quad k \frac{\partial s}{\partial z} + w_g s = \beta s.$$

Здесь z_1 - параметр шероховатости, β - параметр взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью. где β - величина, имеющая размерность скорости и характеризующая взаимодействие примеси с подстилающей поверхностью. Чем больше β , тем больше примеси оседает на подстилающую поверхность. В литературе встречаются значения $\beta = 0,05 - 0,1$ м/с для суши, для водной поверхности $\beta = 1$ м/с [3]. Значения скоростей гравитационного оседания для разных типов аэрозолей приведены в работе [4]. Согласно [3], значения коэффициента горизонтальной диффузии находятся в пределах 500-2000 м²/с. В нашей модели значения компонент скорости ветра и коэффициента вертикальной диффузии могут быть рассчитаны с помощью модели пограничного слоя атмосферы. Можно также задать значения скорости ветра и коэффициента вертикальной диффузии постоянными в пределах расчетного слоя.

С помощью программ, созданных на основе рассмотренной модели в ИВЭП СО РАН, были проведены расчеты выпадения загрязняющего вещества (зола угля) в снег за зимний период (11.2004-03.2005) от ТЭЦ-2 г. Барнаула. ТЭЦ-2 находится в северо-восточной части города, в пределах городской застройки. Параметры источников выбросов загрязняющих веществ определены по данным инвентаризации предприятия. По данным метеостанции г. Барнаула рассчитана роза ветров за рассматриваемый период. Преобладающими оказались ветры южного (25,3%), юго-западного (24,7%), западного (11,7%) направлений, остальные направления характеризуются повторяемостью 1-9%.

Уравнение (1) дискретизировалось по пространственным переменным и решалось методом прямых. Для интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений применялся метод Эйлера первого порядка аппроксимации. Для расчета адвективных членов в уравнении переноса использовалась монотонная разностная схема «направленных разностей» 1-го порядка аппроксимации. Расчетная область составила 25 × 25 км по горизонтали и 300 м по вертикали. Программа производит расчет выпадения примеси в снег за весь зимний период (150 дней). В соответствии с розой ветров определялось число дней за зимний период с определенным направлением ветра. Далее направление ветра менялось автоматически в соответствии с розой ветров. Для области, размеры которой указаны выше, расчет выпадения аэрозоля в снег за 5 месяцев занимает не больше 3 минут, что позволяет проводить многократные расчеты.

Результатом расчета является масса примеси, выпавшая на единицу площади подстилающей поверхности за время расчета. Путем сравнения расчетов с экспериментальными данными [5] подобраны значения эмпирических коэффициентов модели. Наилучшие результаты соответствуют следующим значениям коэффициентов:

$$\mu = 1000 \text{ м}^2/\text{с}, \quad \beta = 0,1 \text{ м/с}, \quad w = 0,1 \text{ м/с}.$$

На рис. 1 приведены рассчитанные изолинии выпавшего в снег загрязняющего вещества (зола угля) от ТЭЦ-2 г. Барнаула за зимний период.

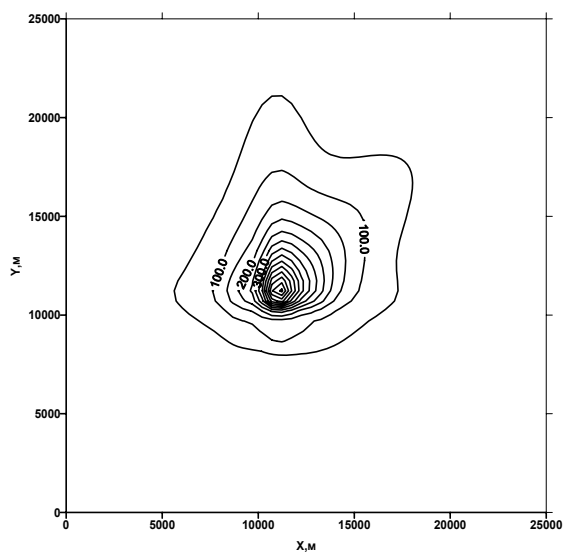


Рис. 1. Схема рассчитанного распределения содержания золы угля (координаты источника 1200 м; 1200 м)

Ореол рассеяния соответствует преобладающим направлениям ветра. Проведенные численные расчеты по нашей модели показали хорошее соответствие с имеющимися экспериментальными данными вблизи источника. Отбор проб снега проводился в конце зимнего сезона 2004/05 г. (5.03.05) в окрестностях ТЭЦ-2 по направлениям преобладающего ветра. По результатам частичного анализа проб содержание загрязняющего вещества составляет 1-5 г/дм² (100-500 г/м²) на расстоянии 800-1000 м от источника. Расчетная величина содержания золы на расстоянии 1000 м от источника составляет 450-600 г/м². Полученные результаты являются определенным этапом в исследовании распространения загрязняющих веществ от промышленных источников. Для окончательных выводов необходимы результаты анализа проб, взятых на различных расстояниях от источника.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н., профессору В.И. Букатому и А.П. Бочкару за предоставленную экспериментальную информацию и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аргучинцева А.В., Аргучинцев В.К., Батурин В.А. и др. Моделирование и управление процессами регионального развития. – М.: Физматлит, 2001. – 431 с.
2. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 319 с.
3. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. – Новосибирск: Наука, 1985. – 254 с.
4. Теверовский Е.Н., Дмитриев Е.С. Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 159 с.
5. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. – Л.: Гидрометеоздат, 1985. – 179 с.