

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩЕГО ВЕЩЕСТВА В АТМОСФЕРЕ С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ НА БАЗЕ МОДЕЛИ ОТРЫВНЫХ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

Запропоновано 2D чисельну модель для прогнозування забруднення атмосфери з урахуванням рельєфу. Наведені результати розрахунків на базі розробленої моделі.

Предложена 2D численная модель для прогноза уровня загрязнения атмосферы с учетом рельефа местности. Представлены результаты численного моделирования.

The 2D numerical model to simulate the pollutant dispersion over complex terrain is proposed. Results of numerical experiment are presented.

Введение

Прогноз загрязнения атмосферы при аварийных выбросах (разливах) токсичных веществ представляет собой важную задачу в области экологической безопасности [6]. Используемые на практике методики прогноза, такие как нормативная методика [3], методика «ТОКСИ» [6], модель Гаусса [1, 8], методика «Phast-Safety» [9] обладают весьма существенным недостатком – при прогнозе не учитывается влияние рельефа местности на процесс рассеивания загрязнителя. Поэтому важной задачей, служащей для повышения качества прогнозной информации, является разработка эффективных методов прогноза рассеивания токсичных веществ в атмосфере с учетом рельефа. Необходимо отметить, что особенностью задач данного класса является требование минимальных затрат компьютерного времени на получение прогнозных результатов. В этой связи применение, в настоящее время, уравнений Навье – Стокса [11] для каждодневных прогнозов является затруднительным, т.к. для практической реализации в рамках этой модели необходимо строить мелкую сетку, что приведет к большим затратам компьютерного времени. Целью данной работы является создание численной модели прогноза рассеивания загрязнителей в атмосфере, учитывающей наиболее существенные физические факторы, влияющие на этот процесс и позволяющей учесть рельеф местности при проведении вычислительного эксперимента.

Математическая модель

Процесс расчета переноса загрязняющих веществ в атмосфере разбивается на два этапа. На первом этапе решается задача гидродинамики и определяется поле скорости воздушного потока с учетом его деформации при обтекании рельефа. Для учета отрыва потока будем использовать модель отрывных вихревых течений идеальной несжимаемой жидкости [2]. В этом случае для расчета поля скорости воздушного потока необходимо найти решение нелинейной системы уравнений гидродинамики [2]:

✓ уравнения переноса завихренности $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ в воздушном потоке

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

✓ уравнения Пуассона для расчета функции тока ψ :

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega. \quad (2)$$

Значение компонент скорости определяется по следующим зависимостям:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad v = \frac{\partial \psi}{\partial x}.$$

При использовании данной модели будем считать, что отрыв потока происходит в угловых точках рельефа. При отрыве потока образуются вихри, интенсивность которых определяется из суммарной циркуляции скорости по

контрольному контуру и физических допущений о «нулевой» относительной толщине пограничного слоя при реальном обтекании. Методика расчета интенсивности вихрей рассмотрена в работе [2].

Решение данных уравнений гидродинамики позволяет на первом этапе рассчитать поле скорости воздушного потока при обтекании рельефа. На втором этапе вычислительного эксперимента осуществляется расчет распространения загрязнителя в атмосфере на базе уравнения [1, 4]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{ grad}C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i),$$

где C – концентрация загрязнителя; u, v – компоненты вектора скорости воздушной среды; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициент турбулентной диффузии; Q – интенсивность выброса загрязнителя; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ – дельта-функция Дирака; x_i, y_i – координаты источника выброса; σ – коэффициент, учитывающий химический распад загрязнителя, вымывание осадками; t – время.

Для приведенных уравнений гидродинамики осуществляется постановка следующих граничных условий. Так, для уравнения Пуассона на поверхности препятствий (рельеф) ставится граничное условие «непротекания» [2]:

$$\psi = 0.$$

На границе входа воздушного потока в расчетную область задается профиль скорости воздушного потока $u = f(y)$ и соответствующее значения функции тока ψ и завихренности ω :

$$\psi|_{\text{вход}} = \psi(y), \quad \omega|_{\text{вход}} = \omega(y).$$

На верхней границе расчетной области также ставится условие «непротекания»:

$$\psi = \text{const}.$$

На границе выхода воздушного потока из расчетной области ставятся «мягкие» граничные условия, необходимые для замыкания разностных уравнений [2].

Будем находить решение стационарной гидродинамической задачи методом установления решения по времени t . Для этого в начальный момент $t = 0$ для завихренности ставится начальное условие типа

$$\omega|_{t=0} = 0$$

$$\text{или } \omega|_{t=0} = \omega_0(x, y).$$

В дискретной модели предусмотрена возможность задавать равномерный профиль ветра на входе в расчетную область или неравномерный. Постановка краевых условий для уравнения переноса примеси рассмотрена в работах [2, 4].

Формирование формы расчетной области

Т.к. рассматривается задача рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере с учетом влияния рельефа, то возникает задача формирования рельефа местности в численной модели (рис. 1). Для решения этой задачи используется метод маркирования расчетной области [2]. Расчет выполняется на прямоугольной разностной сетке, а положение твердых границ (поверхность рельефа) задается с помощью маркеров (рис. 2). Такой подход позволяет очень быстро изменять форму расчетной области (форму рельефа), что важно при проведении серийных расчетов. На твердых границах рельефа выполняется условие непротекания.

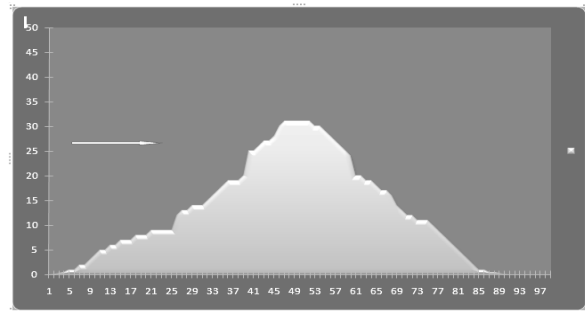


Рис. 1. Физическая модель рельефа

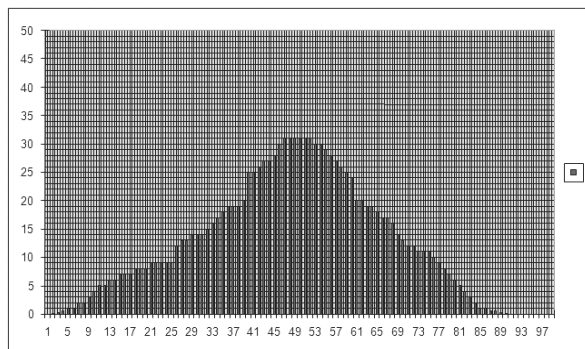


Рис. 2. Дискретная модель рельефа

Использование метода маркирования дает возможность пользователю формировать практически любую форму рельефа, не внося изменений в расчетный код.

Метод решения

Для численного интегрирования уравнений модели (уравнение переноса завихренности, уравнение переноса примеси) применяется неявная попеременно-треугольная разностная схема [2]. Уравнение Пуассона численно интегрируется по методу А. А. Самарского [5]. Отметим, что оба численных метода позволяют рассчитать неизвестную функцию по методу бегущего счета, это дает возможность, совместно с методом маркирования, разработать эффективный и экономичный численный алгоритм расчета рассеивания примесей в областях сложной геометрической формы.

Практическая реализация модели

На основе построенной численной модели и алгоритма расчета разработан код на алгоритмическом языке FORTRAN. Разработанный код был применен для решения следующей задачи. Произошел аварийный выброс в атмосферу токсичного газа (цианистый водород). В результате выброса на месте аварии образовалось облако сложной (грибовидной) формы. На пути облака располагается холм (рис. 1, 3). Средняя концентрация примеси в облаке принята равной 1 (в безразмерном виде). Размеры расчетной области: длина – 300 м, высота – 50 м. Профиль ветра на входе в расчетную область – равномерный, скорость ветра 8,3 м/с. Коэффициент атмосферной диффузии по обоим координатным направлениям равен $2 \text{ м}^2/\text{с}$.

Рассмотрим результаты вычислительного эксперимента. На рис. 3 – 5 показана динамика загрязнения атмосферы для различных моментов времени.



Рис. 3. Зона загрязнения атмосферы, $t = 5 \text{ с}$

Из данных рисунков видно, как происходит натекание облака на холм и расширение облака вверх. Из рис. 5 видно формирование обширной зоны загрязнения на подветренной стороне холма.

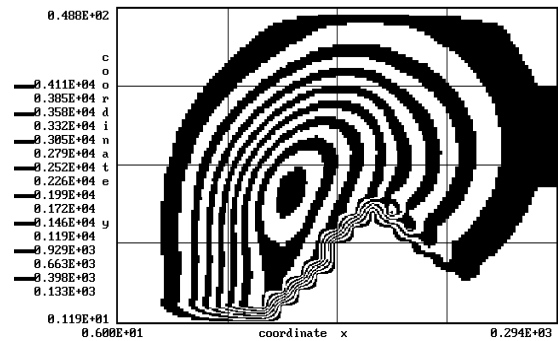


Рис. 4. Зона загрязнения атмосферы, $t = 10 \text{ с}$

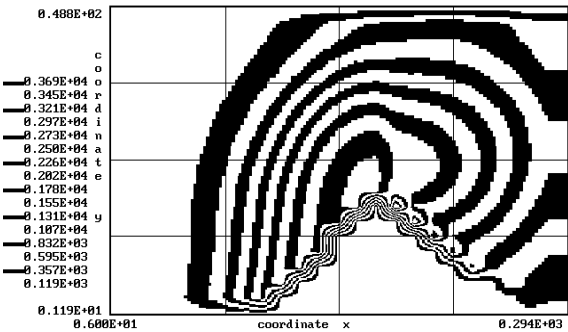


Рис. 5. Зона загрязнения атмосферы, $t = 15 \text{ с}$

В табл.1 представлена динамика изменения максимальной концентрации токсичного газа в облаке.

Таблица 1

Динамика изменения максимальной концентрации токсичного газа в облаке

Время, сек	Максимальная концентрация (в безразмерном виде)
4	0,683
6	0,542
10	0,367
20	0,269
24	0,193

Как видно из таблицы, примерно через 25 с после аварии максимальная концентрация в облаке уменьшится практически в 5 раз за счет достаточно большой скорости ветра. В заключение отметим, что на расчет задачи требуется около 10 с компьютерного времени.

Выводы

Предложена эффективная численная модель и алгоритм расчета рассеивания токсичных газов в атмосфере с учетом рельефа местности. Модель может быть реализована на компьютерах малой и средней мощности. Дальнейшее совершенствование модели следует проводить в направлении ее адаптации к расчету рассеивания тяжелых газов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бруцкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов [Текст] / Е. В. Бруцкий. – К.: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
2. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский и др. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
3. Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті [Текст]. – К., 2001. – 33 с.
4. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 316 с.
5. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
6. Хміль, Г. А. Концептуально-методичний апарат аналізу й оцінки техногенних та природних ризиків [Текст] // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2007. – № 5. – С. 47-55.
7. Шаталов, А. А. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеивания тяжелого газа [Текст] / А. А. Шаталов, М. В. Лисанов // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 9. – С. 46-52.
8. Hanna, S. Air Quality Modeling Over Short Distances [Текст] / S. Hanna // College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modeling: 16 May-3 June 1994. № SMR/760-2 – P. 712-743.
9. Model Evaluation Report on UDM Version 6.0 [Текст] // Cambridge Research Consultants Ltd., Cambridge CB2 1SJ UK, Ref. No. SMEGIS/00/9/E. – 51 p.
10. Murakami, S. Comparison of “ $k-\epsilon$ ” model, ASM and LES with wind tunnel test for flow field around cubic model [Текст] / S. Murakami, A. Mochida, H. Yoshihiko // 8th Intern. Conf. on Wind Engineering, Western Ontario, July 8-11, 1991. – № 12 - 3.

Поступила в редколлегию 23.03.2009.