

А. В. РАДКЕВИЧ, Н. Н. БЕЛЯЕВ, А. А. СТЕПАНЕНКО, С. А. ЯКОВЛЕВ,  
А. И. ШАПТАЛА, В. М. ЛИСНЯК (ДИИТ)

## РАСЧЕТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ АВАРИИ НА БАЗЕ МОДЕЛИ КОНВЕКТИВНО-ДИФFUЗИОННОГО ПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ

На базі тривимірної чисельної моделі виконано розрахунок процесу поширення токсичної речовини у атмосфері. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки. Наводяться результати обчислювального експерименту щодо прогнозу рівня забруднення атмосфери.

На основе трехмерной численной модели рассчитан процесс переноса токсичного вещества в атмосфере. Модель основывается на численном интегрировании уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси. Приводятся результаты вычислительного эксперимента по прогнозу уровня загрязнения атмосферы.

The 3D CFD model to simulate the pollutant transfer after accidents was developed. The model is based on the transport gradient model. The results of numerical experiments are presented.

### Введение

Прогноз загрязнения атмосферы при авариях с химически опасными веществами является первоочередной задачей на этапе разработки ПЛАСа, поскольку дает возможность обосновать размеры зоны поражения и выбрать научно обоснованную стратегию защиты. Для решения этой задачи в настоящее время наибольшее распространение получила модель Гаусса, реализованная в различных коммерческих кодах: *Аммиак*, *Токси*, *SDM*, *PUFF-PLUME* и т.д. Достоинством модели Гаусса является ее простота, но она обладает рядом существенных недостатков и, в частности, не учитывает изменение скорости ветра с высотой, не учитывает геометрическую форму облака, сформировавшегося на месте аварии. Т.е., в данной модели не выполняются критерии геометрического и кинематического подобия. Для более детального моделирования следует применять численное решение уравнения переноса загрязнителя в атмосфере с целью более полного учета особенностей решаемых прогнозных задач.

**Целью работы** явилось применение трехмерной численной модели (CFD model) для расчета процесса загрязнения атмосферы при аварийном выбросе токсичного газа. Особенностью разработанной модели является то, что она позволяет осуществлять трехмерное моделирование процессов рассеивания токсичного газа с учетом неравномерного профиля ветра, геометрической формы облака, сформировавшегося на месте аварии в течение нескольких секунд.

### Математическая модель

Рассматривается процесс загрязнения атмосферы при поступлении в нее токсичного газа в

случае аварии, характеризующейся залповым выбросом загрязнителя. Для расчета процесса загрязнения атмосферы используем трехмерное уравнение переноса примеси (модель градиентного типа):

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum Q_i(t) \delta(r - r_i), \quad (1) \end{aligned}$$

где  $C$  – концентрация примеси (токсичный газ);  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости воздушной среды;  $w_s$  – скорость оседания примеси;  $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  – коэффициенты атмосферной диффузии;  $Q$  – интенсивность выброса токсичного газа;  $\delta(r - r_i)$  – дельта-функция Дирака;  $r_i = (x_i(t), y_i(t), z_i(t))$  – координаты источника эмиссии токсичного газа.

Данная модель позволяет моделировать различные виды аварийных ситуаций – разлив, утечку и т.д. Если рассматривается авария в виде залпового выброса загрязнителя, то в данном уравнении параметр  $Q$  полагается равным нулю, а на месте аварии задается облако (его геометрическая форма), концентрация загрязнителя в нем в начальный момент времени.

В разработанной численной модели используется неравномерный профиль скорости ветра

$$u = u_1 \left( \frac{z}{z_1} \right)^n, \quad (2)$$

где  $u_1$  – скорость ветра на высоте  $z_1$ ;  $n = 0,15$ . Постановка краевых условий для рассмотренного уравнения переноса примеси рассмотрена в работах [2, 3].

### Метод решения

Численное интегрирование уравнения переноса (1) осуществляется с использованием попеременно-треугольной разностной схемы расщепления [2] на прямоугольной разностной сетке. На каждом дробном шаге расчет величины концентрации примеси проводится по формуле бегущего счета. Разработанный код реализован на алгоритмическом языке FORTRAN.

### Практическая реализация

Рассматривается применение трехмерной численной модели для решения прогнозной задачи о загрязнении атмосферы при залповом выбросе аммиака. В физической модели задачи будем считать, что выброс  $\text{NH}_3$  в атмосферу на производстве привел к образованию над местом аварии двух облаков. Известны размеры облаков и концентрация аммиака в них (рис. 1).

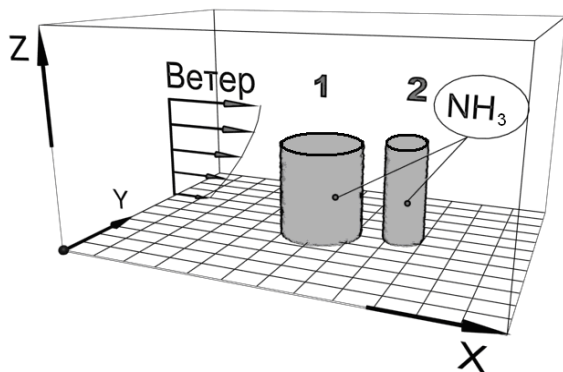


Рис. 1. Схема облаков токсичного газа после аварии: 1, 2 – облака

Ставится задача исследовать динамику загрязнения атмосферы при миграции облаков для известных метеорологических данных.

Расчетная область представляет собой параллелепипед:  $0 \leq X \leq 480$  м,  $0 \leq Y \leq 380$  м,  $0 \leq Z \leq 100$  м. Концентрация загрязнения в облаке в начальный момент времени  $t = 0$  полагается равной  $C = 5 \cdot 10^{-5}$  кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициенты турбулентной диффузии принимаются равными

$$\mu_x \approx \mu_y \approx \mu_z = 2,5 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Рассматривается миграция двух облаков. Размеры первого облака:  $l_x = 96$  м,  $l_y = 162$  м,

$l_z = 76$  м; размеры второго облака:  $l_x = 64$  м,  $l_y = 90$  м,  $l_z = 76$  м,  $\sigma = 0$ .

Результаты моделирования показаны на рис. 2–8, где приведены изолинии концентрации  $\text{NH}_3$  в атмосфере для различных моментов времени. Хорошо видно, что первоначально распределение  $\text{NH}_3$  в облаках равномерно. Это обусловлено заданием начального условия в виде  $C = \text{const}$  в каждом облаке. Далее, с течением времени наблюдается «размытие» формы каждого облака, «вытягивание» их в направлении движения ветра и слияние. Это приводит к постепенному уменьшению начальной концентрации  $\text{NH}_3$  в облаке.

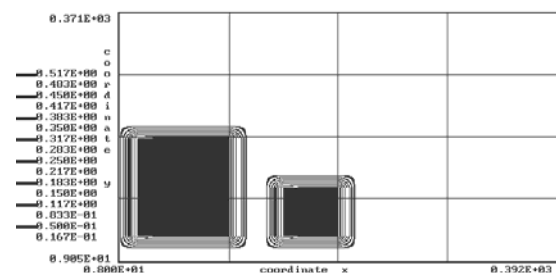


Рис. 2. Изолинии концентрации  $\text{NH}_3$  на уровне  $Z = 19$  м,  $t = 0,1$  с

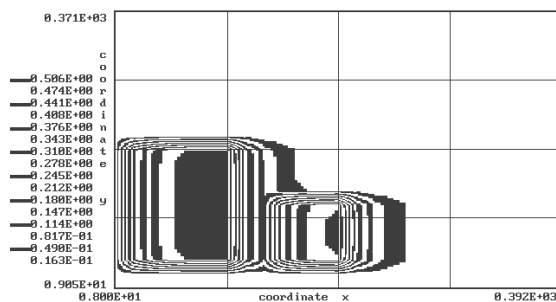


Рис. 3. Изолинии концентрации  $\text{NH}_3$  на уровне  $Z = 19$  м,  $t = 3$  с

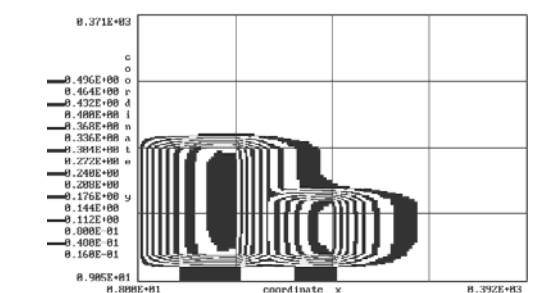


Рис. 4. Изолинии концентрации  $\text{NH}_3$  на уровне  $Z = 19$  м,  $t = 6$  с

Данные результаты позволяют также оценить влияние неравномерного по высоте профиля скорости ветра на процесс рассеивания загрязнителя. Для этого необходимо сравнить, например, рис. 6 и 7. Эта пара рисунков представляет зону загрязнения атмосферы в сходные моменты времени, но в сечениях, расположенных на различной высоте  $Z$  от поверхности

земли. Т.к. на верхних слоях атмосферы скорость ветра больше, то и зона загрязнения здесь значительно больше «сдвинута» в направлении воздушного потока и более «разряжена», поскольку ускоренный здесь конвективный поток «стремится» более интенсивно рассеять загрязнитель.

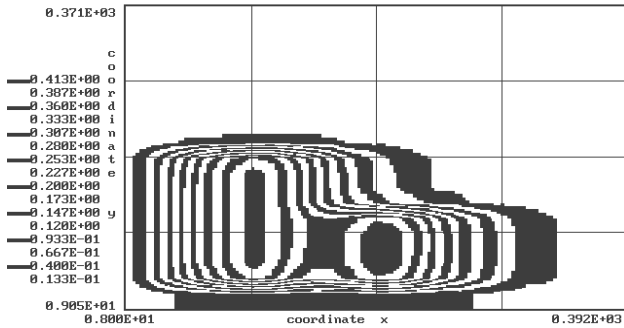


Рис. 5. Изолинии концентрации  $\text{NH}_3$  на уровне  $Z = 19$  м,  $t = 15$  с

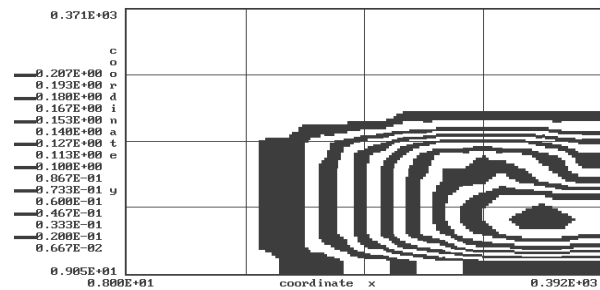


Рис. 6. Изолинии концентрации  $\text{NH}_3$  на уровне  $Z = 19$  м,  $t = 75$  с

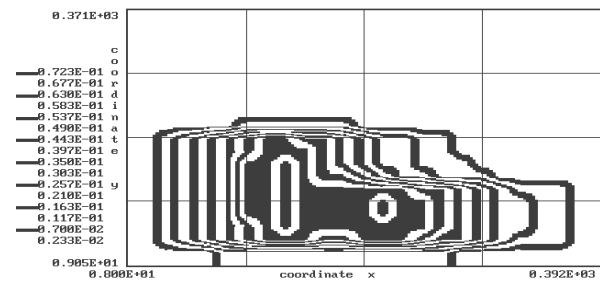


Рис. 7. Изолинии концентрации  $\text{NH}_3$  на уровне  $Z = 86$  м,  $t = 15$  с

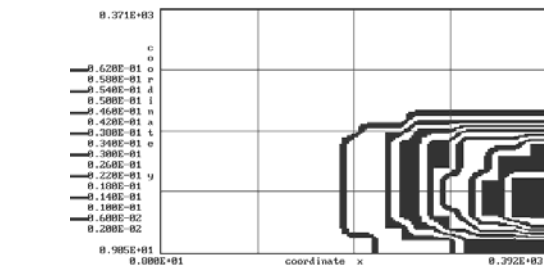


Рис. 8. Изолинии концентрации  $\text{NH}_3$  на уровне  $Z = 86$  м,  $t = 75$  с

На рис. 9 представлена зона загрязнения атмосферы (уровень  $Z = 5$  м) для другой задачи – аварийный выброс аммиака, когда на мес-

те аварии образовалось первичное облако и зона разлива, над которой начал формироваться шлейф в силу испарения загрязнителя.

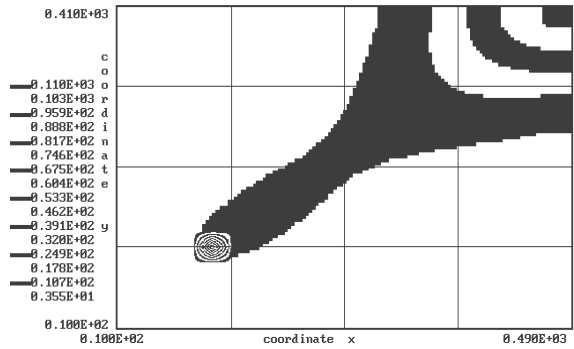


Рис. 9. Изолинии концентрации токсичного газа для момента времени  $t = 237$  с (шлейф от зоны разлива и уходящее первичное облако)

Зона загрязнения, представленная на рис. 9, соответствует моменту времени, когда первичное облако практически ушло из расчетной области, а вслед за ним, от зоны разлива, вытянулся шлейф токсичного газа.

В заключение отметим, что расчет с использованием данной численной модели требует около 5...10 с для получения результатов с помощью разработанного кода.

## Выводы

В работе на основе трехмерной численной модели выполнен расчет процесса рассеивания токсичного газа в атмосфере. Методом вычислительного эксперимента исследована интенсивность загрязнения атмосферы на различной высоте. Дальнейшее развитие данной модели должно быть направлено на создание численной модели для расчета рассеивания тяжелых газов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий [Текст] : учеб. пособие в 5 кн. / под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаева). – М.: Изд-во АСВ, 2001. – 200 с.
2. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский и др. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
3. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
4. Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті [Текст]. – К., 2001. – 33 с.

Поступила в редколлегию 22.03.2010.  
Принята к печати 25.03.2010.