

УДК 519.6

© Н.Н. Беляев, П.Б. Машихина, Л.Я. Мунтян

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ АВАРИИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Предложен метод расчета загрязнения атмосферы при авариях на железнодорожном транспорте. Метод базируется на численном интегрировании уравнения для потенциала скорости и уравнения массопереноса. Для численного интегрирования моделирующих уравнений используются неявные разностные схемы. Представлены результаты вычислительного эксперимента.

Запропоновано метод розрахунку забруднення атмосфери при аваріях на залізничному транспорті. Метод базується на чисельному інтегруванні рівняння для потенціалу швидкості і рівняння масопереносу. Для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь використовуються неявні різницеві схеми. Представлені результати обчислювального експерименту.

The method of calculation of the atmosphere pollution after accidents at the rail way was developed. A method is based on numeral integration of the equation of potential flow and equation of admixture dispersion. To solve the modeling equations the implicit schemes are used. Results of the numerical simulations are presented.

Актуальность. В случае аварий на железнодорожном транспорте может происходить интенсивная эмиссия химически опасных веществ в атмосферу (рис.1). Поэтому возникает важная задача по оценке уровня загрязнения примыкающей территории в случае чрезвычайных ситуаций на транспорте.



Рис. 1. Авария на железной дороге.

Для решения этой задачи используется два подхода. Первый подход – это применение нормативной методики, которая основывается на использовании ряда эмпирических зависимостей. Кроме данной методики, в ряде случаев, используется методика ОНД-86 [2]. Расчетные зависимости перечисленных методик не учитывают метеофакторы. Второй подход – это применение аналитических моделей и моделей типа Гаусса [2]. Однако такие модели не могут быть использованы для прогноза загрязнения атмосферы в масштабе «microscale», когда обязательно необходим учет влияния препятствий на формирование зоны загрязнения в атмосфере. Поэтому актуальной задачей является разработка эффективных методов прогноза аварийного загрязнения атмосферы и в частности для масштаба «microscale».

Целью данной работы является разработка CFD модели для оперативного прогноза уровня загрязнения атмосферы при аварийных выбросах на железнодорожном транспорте.

Математическая модель. Для моделирования процесса рассеивания опасных веществ в атмосфере используется уравнение переноса примеси [1-4]:

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

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

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работе [1]. Для моделирования аэродинамики воздушных потоков при обтекании вагонов, цистерн на дороге используется модель потенциального течения [3]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (2)$$

где P – потенциал скорости.

Таким образом, на базе уравнения (2) моделируется поле ветрового потока с учетом обтекания препятствий. Для численного интегрирования уравнения (2) используется метода условной аппроксимации [5]. Поэтому уравнение для потенциала скорости записывается в эволюционном виде с последующим расщеплением на два дробных шага. Разностные уравнения на каждом дробном шаге имеют вид:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Значение потенциала скорости, на каждом шаге расщепления, рассчитывается по формулам:

$$P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = P_{i,j}^n + \Delta t \cdot \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \Delta t \cdot \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Рассмотрим построение неявной разностной схемы для численного интегрирования уравнения (1) [1, 3].

Производную за временем аппроксимируем разделенной разностью «назад»:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

Конвективные производные запишем в виде:

$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}; \quad \frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y};$$

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}; \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}; \quad v^+ = \frac{v + |v|}{2}; \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

Аппроксимируем конвективные производные разделенными разностями «против потока» на верхнем временном слое следующим образом:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}, \text{ и т.д.}$$

Для аппроксимации вторых производных используются такие зависимости:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1} \text{ и т.д.}$$

В данных зависимостях $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-, M_{xx}^+, M_{xx}^-, M_{yy}^+, M_{yy}^-$ – условные обозначения разностных операторов. Используя эти обозначения, запишем разностную аппроксимацию уравнения переноса при его расщеплении на ряд шагов:

на первом шаге расщепления $k = \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4}; \end{aligned}$$

на втором шаге расщепления $k = n + \frac{1}{2}$, $c = n + \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l; \end{aligned}$$

на третьем шаге расщепления $k = n + \frac{3}{4}$, $c = n + \frac{1}{2}$:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l; \end{aligned}$$

на четвертом шаге расщепления $k = n + 1$, $c = n + \frac{3}{4}$:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l. \end{aligned}$$

Расчёт неизвестного значения концентрации C на каждом дробном шаге рассмотренной разностной схемы, осуществляется по явной формуле бегущего счёта. Это обеспечивает простую программную реализацию данной численной модели и численной модели для расчета поля ветрового потока в масштабе «microscale».

Программная реализация разработанных численных моделей осуществлена с помощью алгоритмического языка FORTRAN.

Для проведения вычислительного эксперимента на базе построенной CFD модели необходимо задать профиль скорости ветра, положение препятствий (вагоны, цистерны), место аварийного разлива (выброса), интенсивность эмиссии химически опасного вещества, продолжительность эмиссии.

Практическая реализация модели. На основе данных разностных схем разработана компьютерная модель, реализованная в виде программы «Emission 2». Данная программа ориентирована на решение таких задач:

1. Прогноз уровня загрязнения атмосферы при аварийных разливах на железной дороге.
2. Прогноз уровня загрязнения атмосферы при аварийных утечках токсичных газов на железной дороге.
3. Прогноз уровня загрязнения атмосферы при залповых выбросах на железной дороге.

Время расчета на основе разработанной численной модели составляет порядка 10 с.

На рис.2,3, в качестве иллюстрации, представлены результаты расчета зоны загрязнения атмосферы при аварийном разливе синильной кислоты на вокзале, где на соседних путях расположены 3 состава.

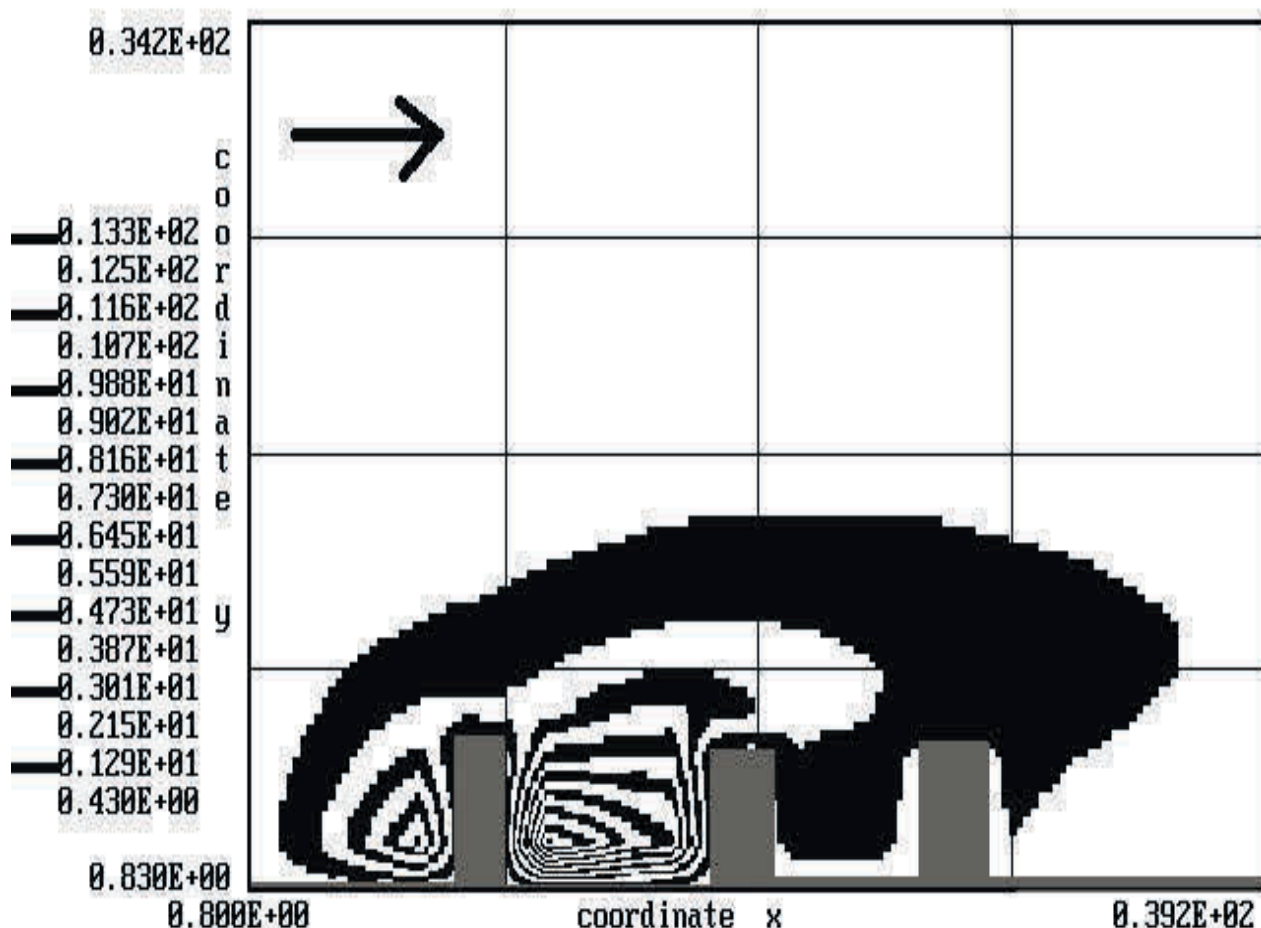


Рис. 2. Зона загрязнения для момента времени $t=8$ сек.

Как видно из данных рисунков на магистрали формируется сложная по форме зона загрязнения. Между составами образуются застойные зоны. Это значит, что нахождение людей в этих зонах – крайне опасно. Из приведенных рисунков также видно, что часть токсичного вещества, в виде «языка» распространяется над составами, вызывая загрязнения прилегающих к железной дороге районов.

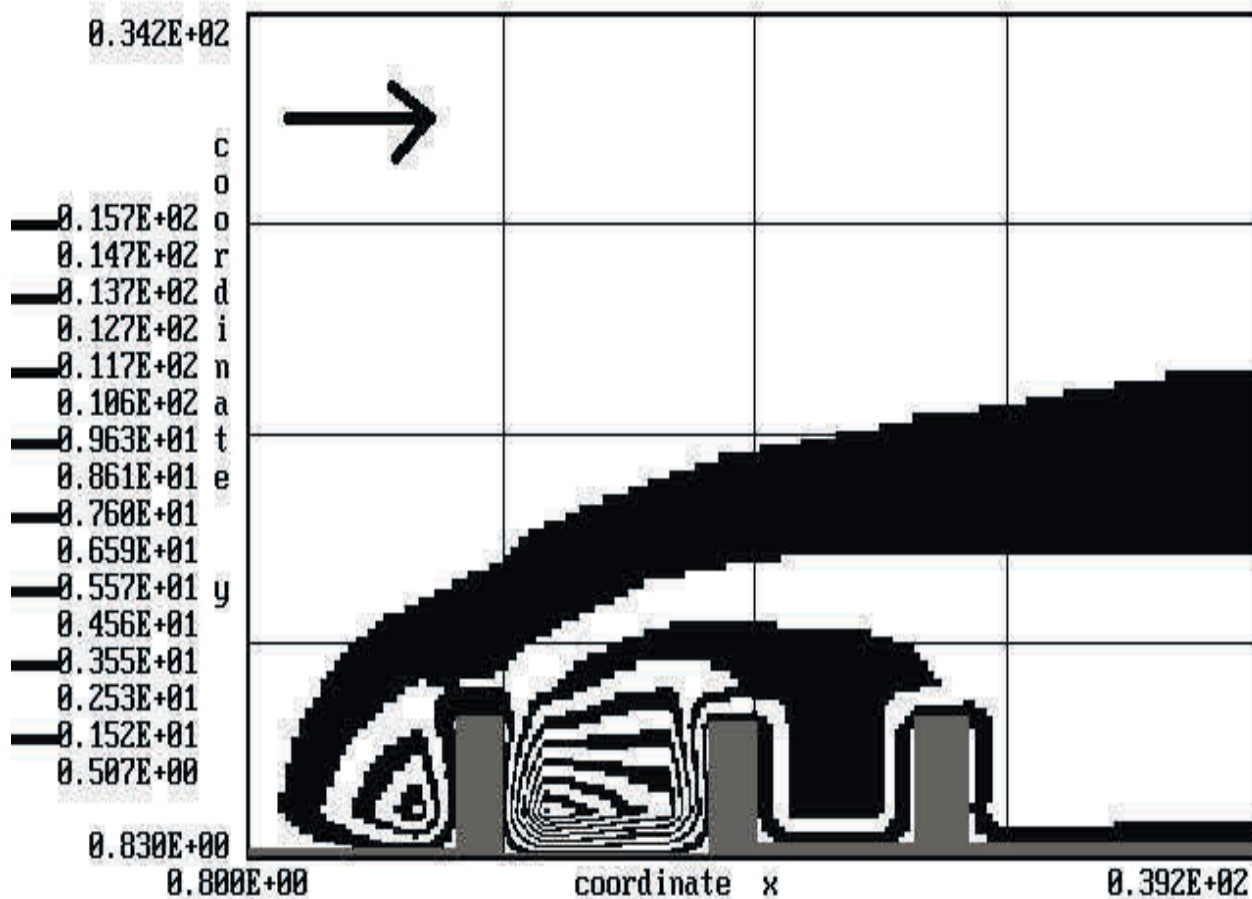


Рис. 3. Зона загрознення для моменту времени $t=45$ сек.

Выводы. В работе рассмотрена численная модель, которая может быть использована для экспресс расчета динамики загрязнения атмосферного воздуха при аварийных ситуациях. Дальнейшее совершенствование данного направления следует проводить в направлении создания 3D модели для расчета рассеивания примеси в атмосфере.

Список литературы

1. Беляев Н. Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ: Монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, Н. В. Росточило. – Д.: «Акцент ПП», 2014. – 136 с.
2. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 273 с.
3. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
4. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Марчук Г. И. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
5. Самарский А. А. Теория разностных схем / Самарский А. А. – М.: Наука, 1983. – 616 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Колесником В.Є.
Надійшла до редакції 15.01.2015*