

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ПРОМПЛОЩАДКАХ

Розроблено тривимірну чисельну модель розрахунку процесу розповсюдження токсичної речовини на промайданчику у разі її витоку з будівлі. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки та на моделі течії невязкої нестислої речовини. Наводяться результати обчислювального експерименту щодо прогнозу рівня забруднення атмосфери.

Разработана трехмерная численная модель расчета процесса распространения токсичных веществ на промплощадке при аварийной эмиссии из здания. Модель основывается на численном интегрировании уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси и на модели течения невязкой несжимаемой жидкости. Приводятся результаты вычислительного эксперимента по прогнозу уровня загрязнения атмосферы.

The 3D model to simulate the pollutant transfer near building after accidents was developed. The model is based on the transport gradient model and the model of inviscid incompressible fluid. The results of numerical experiments are presented.

Введение. Потенциальную опасность для окружающей среды представляют хранилища твердого ракетного топлива. В случае возгорания этого топлива в атмосферу начинают поступать токсичные вещества. Применяемая в настоящее время нормативная методика прогноза последствий аварийных выбросов или разливов опасных веществ [5] дает лишь оценочную информацию о величине возможного химического загрязнения, т.к. она не учитывает ряд важных факторов, среди которых неравномерность профиля ветра, наличие препятствий на пути шлейфа токсичного вещества. Целью данной работы явилась разработка математической модели процесса загрязнения атмосферы на промплощадках при аварийной эмиссии токсичного вещества при горении твердого ракетного топлива. Особенностью рассматриваемой задачи является то, что рассматривается процесс загрязнения атмосферы, когда источник выброса токсичного вещества находится в частично полуразрушенном здании. Предложенная модель позволяет оперативно получить информацию о динамике загрязнения атмосферы с учетом основных физических факторов, влияющих на данный процесс.

Математическая модель миграции загрязнителя в атмосфере. Для расчета процесса загрязнения атмосферы при миграции в ней токсичного газа, выделившегося вследствие горения твердого ракетного топлива в условиях застройки, будем использовать трехмерное уравнение миграции примеси (модель градиентного типа) [2, 3]:

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

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

Для расчета поля скорости воздушного потока на промплощадке делается допущение, что движение воздушной среды – потенциальное, тогда компоненты скорости воздушной среды определяются соотношениями:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial P}{\partial z},$$

где P – потенциал.

Уравнение для определения потенциала имеет вид:

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

Постановка краевых условий для уравнения (2) рассмотрена в работе [3]. Для уравнения (3) ставятся следующие граничные условия:

– на твердых стенках:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0,$$

где n – единичный вектор внешней нормали;

– на входной границе (границы втекания воздушного потока):

$$\frac{\partial P}{\partial n} = V_n,$$

где V_n – известное значение скорости;

– на выходной границе:

$$P = P(x = \text{const}, y) + \text{const}$$

(условие Дирихле).

В разработанной численной модели используется неравномерный профиль скорости ветра и вертикального коэффициента диффузии:

$$u = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n, \quad \mu_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m,$$

где u_1 – скорость ветра на высоте z_1 ; $k_1 = 0,2$; $n = 0,16$; $m \approx 1$.

При необходимости пользователь разработанного пакета прикладных программ имеет возможность задавать иную зависимость скорости ветра и вертикального коэффициента диффузии от высоты.

Метод решения. Численное интегрирование уравнения (1) осуществляется с использованием неявной попеременно-треугольной разностной схемы расщепления [3]. Особенностью данной разностной схемы является то, что на каждом шаге расщепления строится неявная разностная схема. Однако, определение неизвестного значения концентрации токсичного вещества определяется по явной формуле бегущего счета.

Для численного интегрирования уравнения (2) используется идея установления решения по времени, т. е. интегрируется уравнение вида:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2},$$

где τ – фиктивное время.

Численное интегрирование данного уравнения проводится с использованием неявной разностной схемы условной аппроксимации. В разработанном пакете программ осуществляет-

ся также численное интегрирование уравнения (2) с помощью метода Либмана. Расчет поля потенциала проводится одновременно с использованием указанным методов с целью контроля результатов расчета.

Практическая реализация. Будет моделироваться следующая ситуация: в результате аварии произошло разрушение потолка здания и в боковой стене здания образовался (размеры проема 5×10 м) проем. Внутри частично разрушенного здания находятся хранилища твердого ракетного топлива. Это топливо начинает гореть и выделять токсичное вещество (HCl). Таким образом, набегающий на здание ветровой поток не только обтекает здание, но и входит в него через крышу. Выход воздушного потока также осуществляется через крышу и проем в стене. Таким образом, с гидродинамической точки зрения происходит процесс обтекания здания снаружи (внешняя задача аэродинамики) и движение воздушного потока внутри частично полуразрушенного здания (внутренняя задача), где располагается источник эмиссии токсичного вещества.

Вычислительный эксперимент производится при следующих параметрах: интенсивность выброса HCl – 1; скорость ветра (на высоте 10 м) – 5 м/с; коэффициент диффузии $\mu_x = \mu_y = \mu_z = 2,5 \text{ м}^2/\text{с}$; длина маршрута эвакуации – 200 м; люди начинают двигаться по маршруту эвакуации через 10 с после аварии; скорость перемещения людей на маршруте эвакуации – 3 м/с; размеры расчетной области $130 \times 130 \times 60$ м.

Данная задача будет иметь одну отличительную особенность – будет рассматриваться процесс загрязнения атмосферы, когда источник эмиссии загрязнения располагается в частично полуразрушенном здании. Схема расчетной области показана на рис. 1.

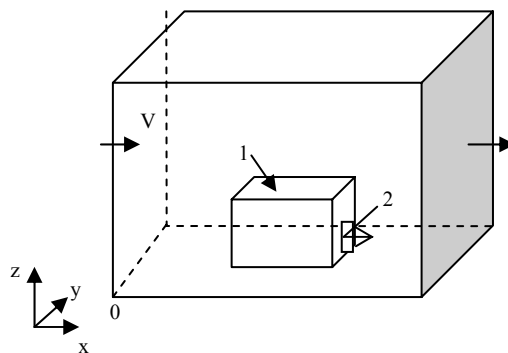


Рис. 1. Схема расчетной области:
1 – корпус здания (без крыши);
2 – проем в стене здания

На последующих рисунках представлена динамика загрязнения воздушной среды на промплощадке после аварии. На рис. 2, 3 отчетливо видно, как шлейф токсичного газа выходит из отверстия в стене производственного корпуса. Видно, что внутри полуразрушенного здания формируется интенсивная зона загрязнения, характеризующаяся большим градиентом концентрации токсиканта. Вне производственного корпуса загрязнитель распространяется в виде шлейфа.

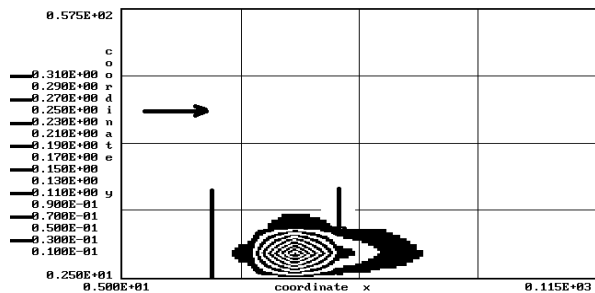


Рис. 2. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 3$ с (сечение $y = 65$ м)

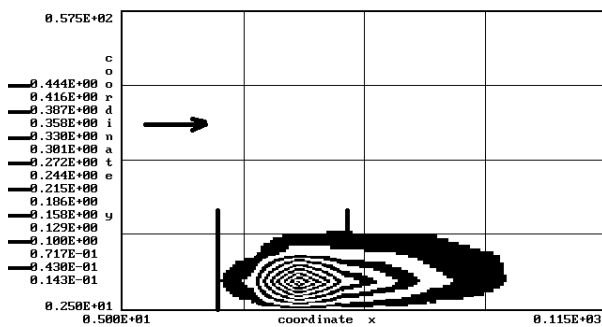


Рис. 3. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 10$ с (сечение $y = 65$ м)

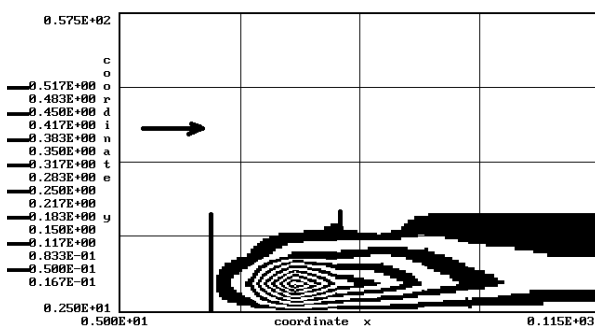


Рис. 4. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 40$ с (сечение $y = 65$ м)

На рис. 5 представлена зона загрязнения для момента времени соответствующего периода, когда прекратилось горение ракетного топлива.

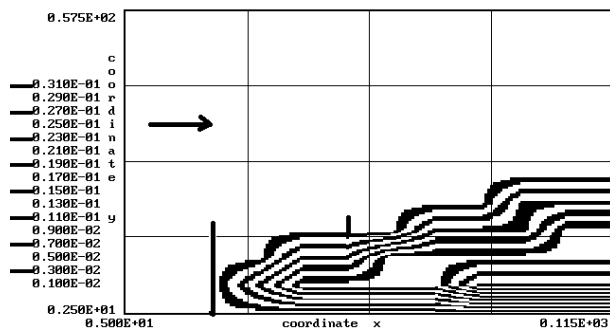


Рис. 5. Зона загрязнения атмосферы через 15 с после прекращения горения ракетного топлива (сечение $y = 65$ м)

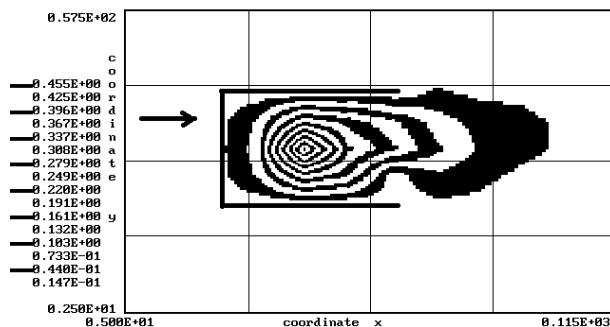


Рис. 6. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 12$ с (сечение $z = 2,5$ м)

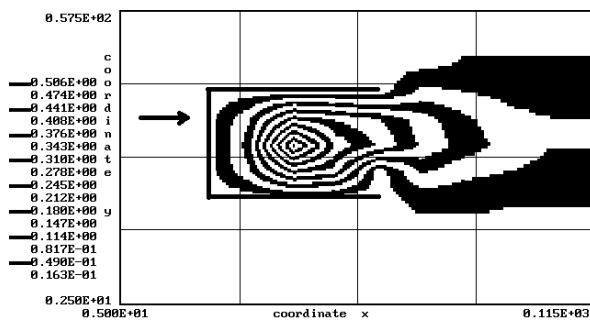


Рис. 7. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 30$ с (сечение $z = 2,5$ м)

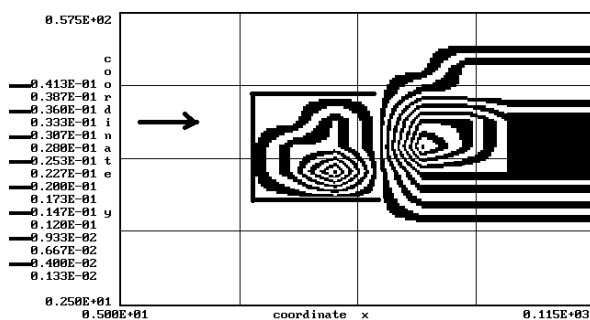


Рис. 8. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 30$ с (сечение $z = 7,5$ м)

Если сравнить этот рисунок с предыдущим, то видно, что изолинии концентрации токсиканта внутри здания стали более разреженными вследствие прекращения «работы» источника

эмиссии и действия воздушного потока и диффузии.

Отметим, что расчет с использованием данной модели требует около 10 с для получения прогнозных данных.

Выводы. В работе разработана трехмерная численная модель, на основе которой построен метод расчета динамики загрязнения воздушной среды на промплощадках при аварийной эмиссии токсичного вещества. Данная модель обладает рядом важных возможностей, необходимых для проектировщика: возможность учета влияния зданий (их формы, различного расположения) на процесс переноса загрязняющих веществ; возможность моделирования различной формы зоны разлива. Дальнейшее развитие данной модели должно быть направлено на создание численной модели для расчета рассеивания тяжелых газов в условиях застройки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Учебное пособие в 5-ти кн. / Под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаяева. – М.: АСВ, 2001. – 200 с.
2. Згуровский М. З. 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.
3. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
4. Мацак В. Г. Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве / В. Г. Мацак, Л. К. Хоцянов. – М.: Медгиз, 1959. – 231 с.
5. Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. – К., 2001. – 33 с.
6. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.

Поступила в редколлегию 04.03.2008.