

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ НА ПРОМПЛОЩАДКАХ

Розроблено тривимірну чисельну модель розрахунку процесу поширення токсичного газу на промплощадці при аварійному викиді. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки та моделі течії нестислої рідини. Наводяться результати обчислювального експерименту.

Разработана трехмерная численная модель расчета процесса распространения токсичного газа на промплощадке при аварийной утечке. Модель основывается на численном интегрировании уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси и на модели невязкой несжимаемой жидкости. Приводятся результаты вычислительного эксперимента.

The 3D numerical model to simulate the toxic gas dispersion on industrial sites after accident ejections was developed. The model is based on the K-gradient transport model and equation of potential flow. The results of numerical experiment are presented.

Введение

В настоящее время большую актуальность приобретает вопрос создания математических моделей прогноза уровня загрязнения атмосферы при аварийных выбросах токсичных веществ (ТВ) на промышленных площадках, позволяющих учесть следующие факторы: различный тип выброса, наличие зданий, метеоусловия [1]. Создание прикладных моделей на базе моделей турбулентности ($k-\varepsilon$ модель, LES модель и т. п.) для решения задач о рассеивании загрязняющих веществ в условиях промплощадки является проблемным в настоящее время, что связано в первую очередь с необходимостью использования мелкой сетки, а это приводит к значительным затратам машинного времени. Нормативная методика, используемая на практике для прогноза уровня загрязнения воздушной среды не учитывает влияние зданий на процесс рассеивания загрязняющих веществ [5]. Целью настоящей работы является создание регуляторной математической модели, ориентированной на использование проектировщиками в повседневной практике. Достоинством предложенной модели является возможность учета основных физических факторов, влияющих на процесс переноса токсичного газа в условиях застройки и при этом небольшие затраты машинного времени при практической реализации модели. Расчет гидродинамики воздушного потока в трехмерной постановке осуществляется в рамках модели невязкой несжимаемой жидкости.

Математическая модель. Для моделирования процесса переноса загрязняющего вещества на промплощадке будем использовать трехмерное уравнение миграции примеси [2–4]

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

где C – концентрация загрязняющего 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 (1) рассмотрена в работе [3]. Для уравнения (2) 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 в помещение)

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

где V_n – известное значение скорости;

- на выходной границе

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

(условия Дирихле).

Метод решения. Численное интегрирование уравнения (1) осуществляется с использованием неявной попеременно-треугольной разностной схемы расщепления [3]. 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 осуществляется также численное интегрирование уравнения (2) с помощью метода Либмана.

Практическая реализация. Рассмотрим применение разработанной численной модели и построенного метода для расчета процесса загрязнения воздушной среды на промплощадке при аварийной утечке аммиака (рис. 1).

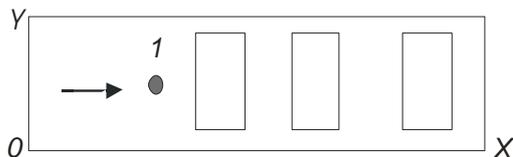


Рис. 1. Схема размещения зданий на промплощадке (план):

1 – место аварийной утечки токсичного газа;

Постановка задачи. На промплощадке в

результате аварии происходит утечка аммиака интенсивностью 300 г/с на временном интервале [0...10 с]. Размеры расчетной области $120 \times 120 \times 60$ м; скорость ветра 8,5 м/с; коэффициент турбулентной диффузии $2 \text{ м}^2/\text{с}$. Координаты источника выделения токсичного газа $x = 25$ м, $y = 45$ м, $z = 12,5$ м (из рис. 1 видно, что утечка токсичного газа происходит за первым зданием). В процессе моделирования исследуется интенсивность загрязнения воздушной среды внутри производственного помещения, расположенного во втором здании, на третьем этаже. Токсичный газ попадает через воздухозаборник системы приточной вентиляции (рецептор). Координаты данного рецептора: $x = 65$ м, $y = 55$ м, $z = 12,5$ м (см. рис. 1). Баланс количества токсичного вещества в помещении описывается следующим уравнением:

$$VdC_{\text{пом}} = LCdt - LC_{\text{пом}}dt,$$

где V – объем помещения; $C_{\text{пом}}$ – концентрация ТВ в выходящем из помещения воздухе; L – воздухообмен; C – концентрация ТВ во втекающем воздухе.

Для решения данного уравнения используется метод Эйлера.

Динамике уровня загрязнения воздушной среды в помещении после аварии выглядит следующим образом:

$t = 6$ с.....	$C = 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ г/м}^3$
$t = 8$	$C = 0,3 \cdot 10^{-4}$
$t = 12$	$C = 0,00014$
$t = 14$	$C = 0,00022$
$t = 16$	$C = 0,00031$
$t = 20$	$C = 0,00046$
$t = 26$	$C = 0,00055$
$t = 30$	$C = 0,00058$

Хорошо видно, что уровень загрязнения воздушной среды в помещении начинает возрастать через 14 с после аварии.

На рис. 2–5 показана динамика формирования зоны загрязнения на промплощадке для различных моментов времени, соответствующих временному интервалу выделения аммиака. Хорошо видно, что формирующаяся зона загрязнения может быть условно разбита на две части. Первая часть – это шлейф, простирающийся над зданиями. Вторая часть – это подзоны, которые образуются между зданиями и создающие опасность токсичного поражения людей, покидающих здания.

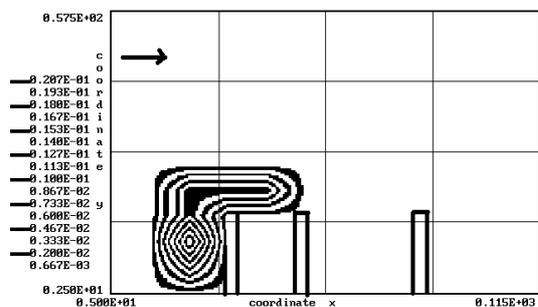


Рис. 2. Зона загрязнения для момента времени $t = 4$ с

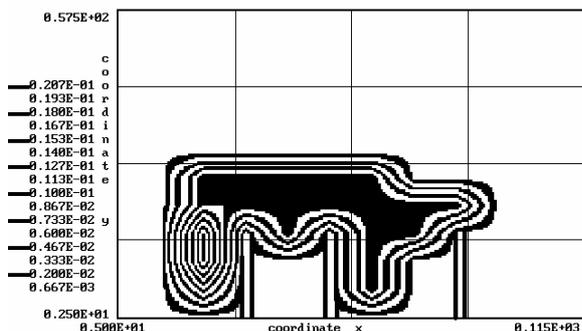


Рис. 3. Зона загрязнения для момента времени $t = 8$ с

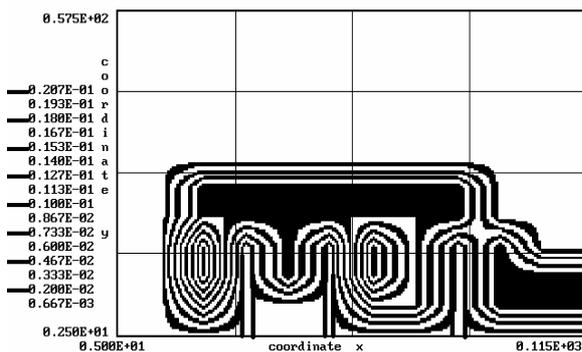


Рис. 4. Зона загрязнения для момента времени $t = 10$ с

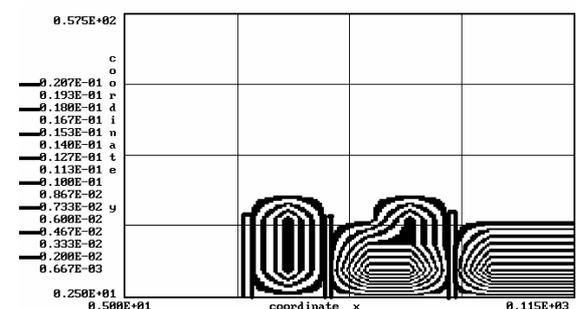


Рис. 5. Зона загрязнения для момента времени $t = 26$ с

На рис. 5 представлена зона загрязнения воздушной среды на промплощадке для момента времени, когда прекратилось выделение токсичного газа. Как видно из рис. 5 воздушная среда возле первого здания (навстречная сторона) уже не содержит токсичное вещество. Тем не менее в плохопроветриваемых местах между зданиями сохранились подзоны, загрязненные аммиаком.

Выводы

В работе разработана трехмерная численная модель, на основе которой построен метод расчета динамики миграции токсичных веществ в случае аварий на промплощадках. На основе разработанной модели создан пакет прикладных программ, реализованный на алгоритмическом языке FORTRAN. Проведенный вычислительный эксперимент показал эффективность модели для практики (возможность учета в модели основных физических факторов, влияющих на процесс рассеивания, возможность учета различного количества зданий на промплощадке). Дальнейшее совершенствование данного направления необходимо вести по созданию численной модели для расчета рассеивания тяжелых газов на промплощадках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Учебное пособие в 5-ти книгах / Под редакцией В. А. Котляревского и А. В. Забегаева). – М.: Из-во 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. Самарский А. А. Теория разностных схем / 2-е изд., испр. – М.: Наука. – 1983. – 616 с.
5. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств / 3-е изд., перераб. – М.: Химия. – 1980. – 288 с.

Поступила в редколлегию 29.03.2007.