

РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В УСЛОВИЯХ ЗАСТРОЙКИ

Розроблено тривимірну чисельну модель розрахунку процесу розповсюдження забруднюючих речовин на промплощадці при аварійному викиді. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки та моделі течії нестислої рідини. Наводяться результати обчислювального експерименту по прогнозу рівня забруднення атмосфери та оцінки токсичного ураження людей.

Разработана трехмерная численная модель расчета процесса распространения загрязняющих веществ на промплощадке при аварийной выбросе. Модель основывается на численном интегрировании уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси и на модели невязкой несжимаемой жидкости. Приводятся результаты вычислительного эксперимента по прогнозу уровня загрязнения атмосферы и оценки токсичного поражения людей.

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 of atmosphere pollution and toxic hazard are presented.

Введение

В последнее время особый интерес приобретают задачи, связанные с прогнозом токсичного поражения людей на промплощадках в случае аварий, сопровождающихся выбросом в атмосферу токсикантов. Для решения этих задач в настоящее время не предоставляется возможным использование моделей гидродинамики типа $k-\varepsilon$ модель, LES модель и т. д. Это связано с тем, что практическое применение таких моделей требует мелкой расчетной сетки, что приводит к значительным затратам машинного времени при проведении вычислительного эксперимента. В этой связи для прогноза уровня загрязнения воздушной среды в условиях застройки на практике обычно используются эмпирические модели. Их существенным недостатком является то, что модели не позволяют учесть влияние зданий на процесс распространения токсичных веществ. В этой связи особую актуальность приобретают создание математических моделей, позволяющих учесть этот фактор, а с другой стороны требовать небольших затрат времени при практической реализации на персональном компьютере. Целью настоящей работы является создание эффективной математической модели, позволяющей в режиме реального времени выполнить прогноз загрязнения воздушной среды в условиях застройки при аварии.

Математическая модель. Для расчета процесса переноса токсичного газа в условиях застройки будем использовать трехмерное

уравнение миграции примеси (модель градиентного типа) [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]. Особенностью данной разностной схемы является то, что при решении уравнения (1) расчет разбивается на четыре шага. 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 осуществляется 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. Рассмотрим применение разработанной численной модели для решения задачи о миграции облака токсичного газа на промышленной площадке, где расположены два здания (рис. 1).

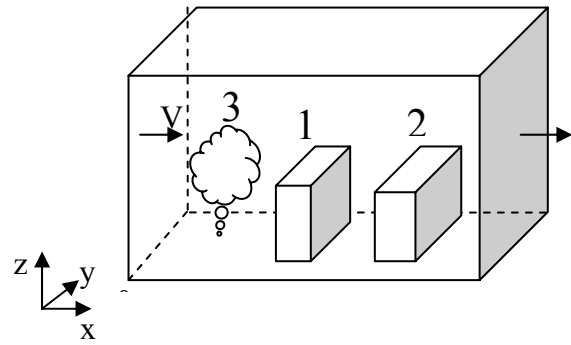


Рис. 1. Схема размещения зданий на промплощадке:

1, 2 – здания; 3 – грибовидное облако токсичного газа

Рассматривается следующая постановка задачи. На промплощадке в результате аварии происходит залповый выброс аммиака. В результате выброса на месте аварии образуется грибовидное облако (рис. 1), имеющее размеры: высота облака – 15 м, ширина «ножки» – 10 м, ширина «шляпки» 30×30 м. Размеры расчетной области $120 \times 120 \times 60$ м; скорость ветра 3,5 м/с; коэффициент турбулентной диффузии $2 \text{ м}^2/\text{с}$. Профиль ветра – равномерный. Средняя концентрация аммиака в облаке составляет $1272 \text{ г}/\text{м}^3$, т. е. в облаке находится около 7 тонн токсичного газа.

При миграции токсичного газа на промплощадке будет происходить загрязнение атмосферы. В данной работе кроме задачи о прогнозе уровня загрязнения атмосферы на промплощадке решается другая важная задача – прогноз экологической безопасности маршрута эвакуации людей. На рис. 2 штриховой линией показан этот маршрут: он начинается из торца первого здания и проходит за второе здание. Длина маршрута – 90 м. Ставится задача: каково будет токсичное поражение людей при их перемещении по этому маршруту, если они покидают первое здание. Для прогноза токсичного поражения осуществляется расчет величины токсодозы

$$TD = \int_0^t C dt,$$

где C – концентрация токсичного газа в точке расположения рецептора (человека) на маршруте эвакуации; t – время.

Сложность решения данной задачи состоит в том, что данная концентрация C изменяется с течением времени в виду миграции облака, а с другой стороны происходит перемещение людей по маршруту эвакуации, т. е. $C = f(x, y, z, t)$.

Перейдем к рассмотрению результатов проведенного вычислительного эксперимента. Рассмотрим сначала вопрос о токсичном поражении

нии людей при их эвакуации. Будем считать, что персонал передвигается по маршруту эвакуации со скоростью 3 м/с. Рассматриваются два сценария: в первом сценарии предполагается, что эвакуация людей по маршруту (от торца первого здания) началась сразу после залпового выброса, т.е. в момент времени $t = 0$.

Динамика изменения величины токсодозы для первого сценария выглядит следующим образом:

$t = 5$ с	$TD = 2,33$ мг·мин/л
$t = 7,5$ с	$TD = 2,33$ мг·мин/л
$t = 10$ с	$TD = 7,88$ мг·мин/л
$t = 15$ с	$TD = 13,02$ мг·мин/л
$t = 17,5$ с	$TD = 15,64$ мг·мин/л
$t = 20$ с	$TD = 17,69$ мг·мин/л
$t = 22,5$ с	$TD = 18,62$ мг·мин/л

Во втором сценарии предполагается, что эвакуация людей из первого здания началась в момент времени $t = 8$ с, т.е. это время понадобилось на то, чтобы люди покинули здание. В этом случае величина токсодозы изменяется следующим образом:

$t = 10$ с	$TD = 1,11$ мг·мин/л
$t = 12,5$ с	$TD = 7,26$ мг·мин/л
$t = 15$ с	$TD = 12,55$ мг·мин/л
$t = 17,5$ с	$TD = 17,06$ мг·мин/л
$t = 20$ с	$TD = 21,10$ мг·мин/л
$t = 22,5$ с	$TD = 25,00$ мг·мин/л

Если учесть, что токсичное поражение людей может наступить при величине токсодозы $TD = 10$ мг·мин/л, то становится очевидным, что на данном маршруте эвакуации уже через 15 с после аварии будет иметь место токсичное поражение эвакуируемых людей.

На последующих рисунках представлена динамика загрязнения воздушной среды на промплощадке после аварии. На рис. 3 отчетливо видно грибовидное облако, образовавшееся на промплощадке возле первого здания. На рис. 4 показано как токсичное облако вплотную подошло к первому зданию и начинает формироваться зона загрязнения за этим зданием. Из рис. 5, 6 хорошо видно, как интенсивно происходит загрязнение воздушной среды возле всех зданий на промплощадке после аварии. Как видно из рис. 7 спустя 80 с после аварии загрязненной останется область за вторым зданием, что создаст угрозу токсичного поражения людей, покидающих это здание.

Таким образом, результаты проведенного вычислительного эксперимента позволяет сделать вывод о том, что аварии аналогичного типа на промплощадках способны вызвать крайне негативные последствия вплоть до смертельного поражения людей.

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.

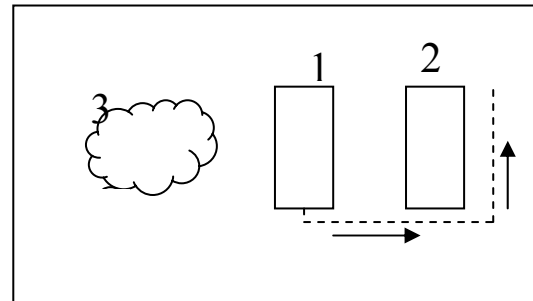


Рис. 2. Схема размещения объектов (план):
1, 2 – здания; 3 – облако токсичного газа;
----- маршрут эвакуации людей

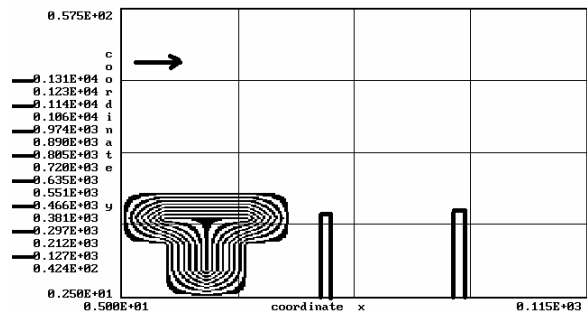


Рис. 3. Зона загрязнения для момента времени $t = 0$ с

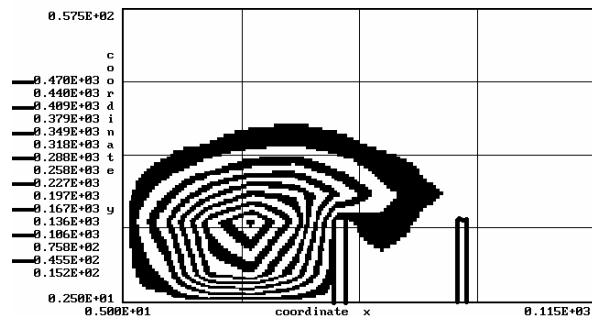


Рис. 4. Зона загрязнения для момента времени $t = 4$ с

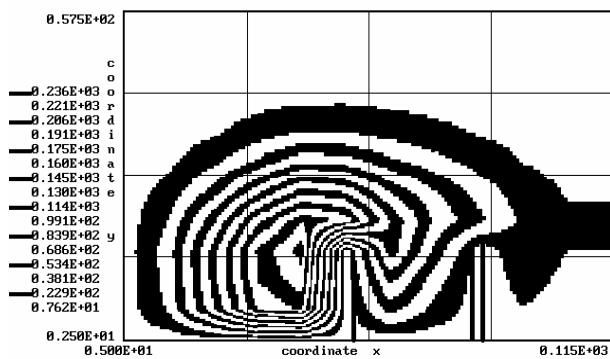


Рис. 5. Зона загрязнения для момента времени $t = 8$ с

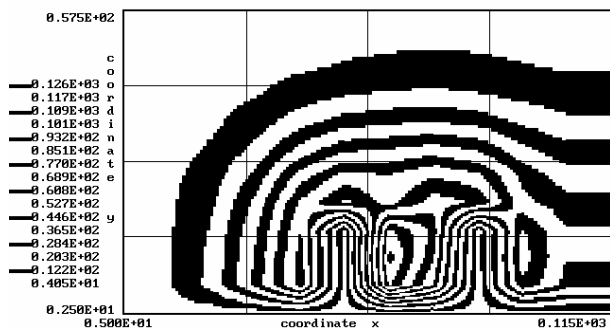


Рис. 6. Зона загрязнения для момента времени $t = 23$ с

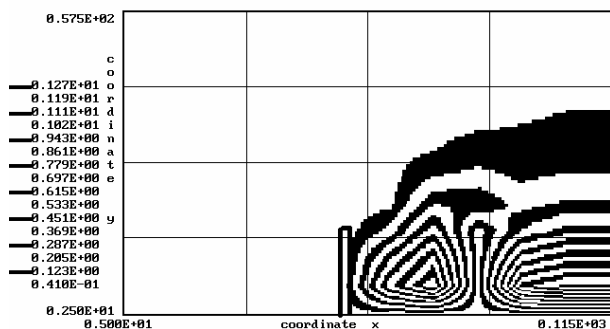


Рис. 7. Зона загрязнения для момента времени $t = 80$ с

Выводы

В работе предложена трехмерная численная модель, на основе которой построен метод рас-

чета динамики миграции токсичных веществ в случае залповых выбросов на промплощадках.

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 облака токсичного газа, которое формируется на месте аварии; возможность моделирования залпового выброса токсичного газа в любом месте на промплощадке. Предложенная модель позволила впервые решить важную задачу в области экологической безопасности – прогноз степени безопасности маршрутов эвакуации людей на предприятиях в случае аварий, сопровождающихся выбросом в атмосферу токсичных веществ. Проведенный вычислительный эксперимент показал эффективность модели для практики. 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. Учеб. пособ. в 5-ти книгах / Под редакцией 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. 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 07.06.2007.