

## ОЦЕНКА РИСКА ТОКСИЧНОГО ПОРАЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ ПРИ АВАРИЙНОМ ВЫБРОСЕ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНОГО ВЕЩЕСТВА

Розроблено тривимірну чисельну модель розрахунку процесу розповсюдження токсичної речовини на промайданчику в разі аварійного викиду. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки та на моделі течії невязкої нестислої речовини. Наводяться результати обчислювального експерименту щодо прогнозу токсичного ураження людей.

Разработана трехмерная численная модель расчета процесса распространения токсичного вещества на промплощадке при аварийном выбросе. Модель основывается на численном интегрировании уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси и на модели течения невязкой несжимаемой жидкости. Приводятся результаты вычислительного эксперимента по прогнозу токсичного поражения людей.

The 3D numerical model to simulate the toxicant propagation at an industrial site after the emergency blow-out was developed. The model is based on the transport gradient model and the model of inviscous incompressible fluid. The results of numerical experiments are presented.

**Введение.** На химически опасных объектах существует потенциальная угроза аварийных выбросов (разливов) токсичных загрязнителей. Актуальной задачей является прогнозирование риска токсичного поражения людей на объекте и, в частности, людей, находящихся в производственных помещениях. Существующая нормативная методика не дает возможности прогнозировать такой вид риска в зависимости от конкретного сценария аварии, расположения зданий на промплощадке и т.д. Поэтому для разработки планов ликвидации последствий аварий необходимо иметь методики, позволяющие оценивать риск токсичного поражения людей на объекте. Целью данной работы является разработка математической модели прогноза уровня загрязнения атмосферы на промплощадке при аварийных выбросах токсичных загрязнителей и риска токсичного поражения людей на промышленном объекте, в первую очередь, людей, находящихся внутри зданий, для анализа последствий возможных аварий на объекте.

**Математическая модель миграции токсичного вещества в атмосфере.** Для расчета процесса загрязнения атмосферы при миграции в ней токсичного вещества (аварийная утечка) будем использовать трехмерное уравнение миграции примеси (модель градиентного типа) [2, 3]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} =$$

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

где  $C$  – концентрация токсичного вещества;  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости воздушной среды;  $w_s$  – скорость оседания;  $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  – 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:

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

(условие Дирихле).

Процессами теплообмена будем пренебрегать.

В разработанной численной модели используется неравномерный профиль скорости ветра:

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

где  $u_1$  – скорость ветра на высоте  $z_1$ ;  $n = 0.16$ .

**Метод решения.** Численное интегрирование уравнения (1) осуществляется с использованием неявной попеременно-треугольной разностной схемы расщепления [2]. При построении разностной схемы осуществляется расщепление уравнения переноса примеси на три шага. На первом шаге учитывается перенос загрязнителя только под действием ветра. На втором шаге осуществляется расчет переноса загрязнителя только под действием атмосферной диффузии. На третьем шаге осуществляется учет влияния источника выброса на процесс загрязнения. 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  $\tau$  – фиктивное время.

Численное интегрирование данного уравнения проводится с использованием неявной разностной схемы условной аппроксимации [5]. В разработанном пакете программ осуществляется также численное интегрирование уравне-

ния (2) с помощью метода Либмана. Расчет поля потенциала проводится одновременно с использованием указанных методов с целью контроля результатов расчета. На основе рассмотренной математической модели создан специализированный пакет программ на алгоритмическом языке FORTRAN.

**Практическая реализация.** Рассмотрим применение разработанной численной модели для решения задачи о загрязнении атмосферы на промышленной площадке, где произошел аварийный выброс токсичного газа – цианистого водорода (рис. 1).

Пусть в помещении произошла авария, в результате которой через пролом в крыше стал поступать загрязнитель (цианистый водород) в пространство между двумя зданиями (рис. 1, 2). Ставится задача оценки возможного токсичного поражения людей в соседнем здании (полагается, что токсичный газ может попасть внутрь помещений второго здания через окно на фасаде (позиция 2, рис. 1) и через воздухозаборник, расположенный на торце здания – позиция 1, рис. 1).

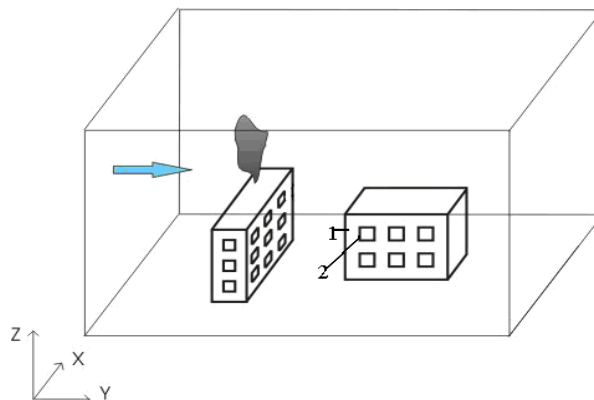


Рис. 1. Схема расчетной области.  
1, 2 – положение рецептора (окно)

Параметры задачи: профиль ветра – неравномерный, скорость ветра на высоте 10 м составляет 2.5 м/с; коэффициент диффузии равен 2 м<sup>2</sup>/с; интенсивность эмиссии токсичного газа – 500 г/с; координаты источника эмиссии (крыша на первом здании) откуда поступает токсичный газ в атмосферу  $x = 55$  м;  $y = 65$  м;  $z = 20$  м. Выброс газа осуществляется в течение 10 сек.

Координаты рецептора (окно на фасаде второго здания)  $x_1 = 65$  м;  $y_1 = 55$  м;  $z_1 = 15$  м; координаты воздухозаборника на торце второго здания  $x_2 = 85$  м;  $y_2 = 35$  м;  $z_2 = 15$  м. Размеры расчетной области 120×120×60 м. Воздухообмен в помещениях второго здания составляет

0.83 м<sup>3</sup>/с; объем помещений во втором здании  $V_1 = V_2 = 200 \text{ м}^3$ .

Для расчета кожной (резорбтивной) токсодозы считаем, что открытой поверхностью является лицо человека  $S \approx 0.04 \text{ м}^2$ . Коэффициент диффузии токсичного газа в помещении можно рассчитать по зависимости [4]:

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^m,$$

где  $\mu_0$  – коэффициент диффузии при температуре 273 °С и давлении 760 мм рт. ст.;  $T$  – температура, для которой определяется величина  $\mu$ ;  $m \approx 1.75 \div 2$  – параметр.

Следует иметь ввиду, что движение людей вызовет дополнительную турбулизацию потока, поэтому величина  $\mu$ , рассчитанная по данной зависимости, будет определять минимальное значение данного параметра. Величина  $\mu_0$  принимается по табл. 19 [4]. Если в таблице отсутствует значение  $\mu_0$  для требуемого вещества, то дается рекомендация – выбирать  $\mu_0$  для вещества, имеющего примерно такой же молекулярный вес [4]. Поэтому примем  $\mu_0 \approx 0.1 \text{ см}^2/\text{с}$ ;  $m = 2$ . Расчет величины  $\mu$  осуществляем для температуры воздуха в помещении 20 °С.

Динамика изменения величины кожной токсодозы для людей, находящихся в помещении, такова (фасад второго здания, позиция 2 на рис. 1):

$t = 60 \text{ с}$ .....	$TD_s = 0.14 \cdot 10^{-4} \text{ г}$
$t = 91 \text{ с}$ .....	$TD_s = 0.39 \cdot 10^{-4} \text{ г}$
$t = 150 \text{ с}$ .....	$TD_s = 0.39 \cdot 10^{-3} \text{ г}$
$t = 200 \text{ с}$ .....	$TD_s = 0.21 \cdot 10^{-3} \text{ г}$
$t = 332 \text{ с}$ .....	$TD_s = 0.50 \cdot 10^{-3} \text{ г}$

Динамика изменения ингаляционной токсодозы в этом помещении такова:

$t = 60 \text{ с}$ .....	$TD = 0.00058 \text{ (мг/л)·мин}$
$t = 91 \text{ с}$ .....	$TD = 0.0016 \text{ (мг/л)·мин}$
$t = 150 \text{ с}$ .....	$TD = 0.005 \text{ (мг/л)·мин}$
$t = 200 \text{ с}$ .....	$TD = 0.008 \text{ (мг/л)·мин}$
$t = 332 \text{ с}$ .....	$TD = 0.021 \text{ (мг/л)·мин}$

Теперь рассмотрим, как изменяется величина параметров  $TD$  и  $TD_s$  для помещения, воздухозаборник которого располагается на торце второго здания, т.е. достаточно близко к источнику выброса (позиция 1, рис. 1).

Динамика изменения величины токсодозы в этом помещении такова:

$t = 60 \text{ с}$ .....	$TD = 0.004 \text{ (мг/л)·мин}$
$t = 91 \text{ с}$ .....	$TD = 0.014 \text{ (мг/л)·мин}$
$t = 150 \text{ с}$ .....	$TD = 0.041 \text{ (мг/л)·мин}$
$t = 200 \text{ с}$ .....	$TD = 0.07 \text{ (мг/л)·мин}$
$t = 332 \text{ с}$ .....	$TD = 0.15 \text{ (мг/л)·мин}$

Динамика изменения кожной токсодозы в данном помещении следующая:

$t = 60 \text{ с}$ .....	$TD_s = 0.11 \cdot 10^{-3} \text{ г}$
$t = 91 \text{ с}$ .....	$TD_s = 0.33 \cdot 10^{-3} \text{ г}$
$t = 150 \text{ с}$ .....	$TD_s = 0.10 \cdot 10^{-2} \text{ г}$
$t = 200 \text{ с}$ .....	$TD_s = 0.17 \cdot 10^{-2} \text{ г}$
$t = 332 \text{ с}$ .....	$TD_s = 0.37 \cdot 10^{-2} \text{ г}$

Проанализируем полученные результаты. Принимая во внимание, что симптомы отравления цианистым водородом начинаются при величине пороговой ингаляционной токсодозы  $TD \approx 0.02 \div 0.04$ , то люди, находящиеся в первом помещении, примерно через 2.5 мин после аварии «получат» эту токсичную дозу. Значит, люди должны покинуть данное помещение примерно через 2 мин после аварии. Через 5 мин после аварии величина токсодозы, полученная людьми, будет почти в 4 раза превосходить это пороговое значение. Таким образом, при данном объеме эмиссии при аварии, если люди не покинут помещение, через 2 мин после аварии следует ожидать их токсичного поражения. Для второго помещения (фасад второго здания) величина ингаляционной токсодозы через 5 мин после аварии будет соответствовать величине пороговой токсодозы. Значит, люди, находящиеся во втором помещении, имеют «запас» на 3 мин больший на эвакуацию, чем люди, находящиеся в первом помещении. Для оценки токсичного поражения людей при резорбтивном воздействии (через кожный покров) токсиканта проанализируем данные по оценке величины кожной токсодозы при аварии. Если принять во внимание, что величина поверхностной токсодозы, вызывающей симптомы отравления у 50% пораженных, составляет величину порядка 1000 – 5000 мг/чел, то можно утверждать, что у персонала, находящегося в помещении, «полученная» кожная токсодоза будет достаточно высокой. Таким образом, при аварии персонал получит токсичное поражение, как за счет ингаляционного воздействия, так и за счет кожного.

На рис. 2 представлена зона загрязнения на промплощадке (вид сбоку), позволяющая оценить размеры зоны загрязнения по высоте. Из данного рисунка можно видеть, что часть токсичного газа от источника эмиссии попадает

в пространство между зданиями и формирует ту зону загрязнения, которая представлена на рис. 3, 4. Из рис. 4 видно, что зона загрязнения вокруг зданий отсутствует и только между зданиями наблюдается накопление токсичного вещества.

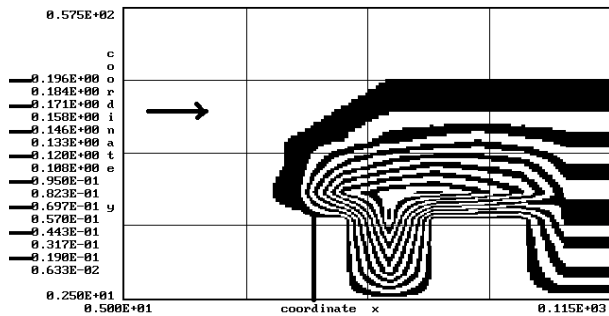


Рис. 2. Зона загрязнения атмосферы,  $t = 17$  с (сечение  $y = 60$  м)

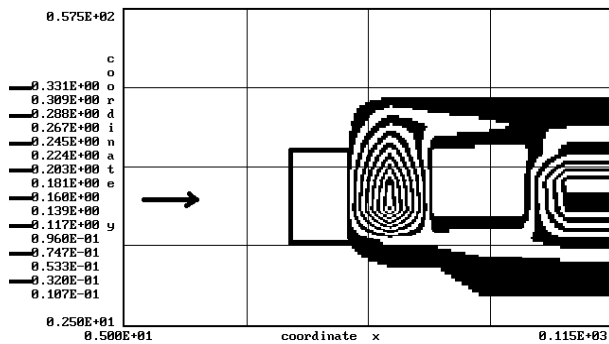


Рис. 3. Зона загрязнения атмосферы,  $t = 42$  с (вид сверху, сечение  $z = 10$  м)

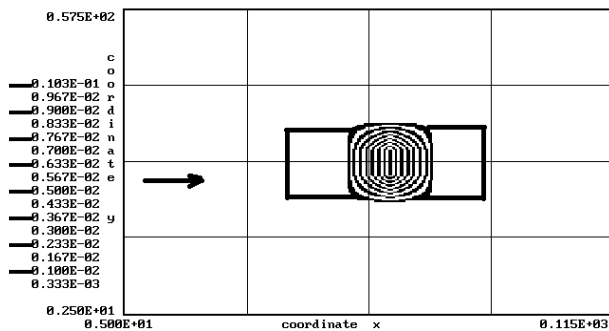


Рис. 4. Зона загрязнения атмосферы,  $t = 332$  с (вид сверху, сечение  $z = 10$  м)

Отметим, для решения каждой задачи требуется около 5 с машинного времени ПК.

**Выводы.** В работе разработана трехмерная численная модель, на основе которой построен метод расчета динамики загрязнения воздушной среды на промплощадках при аварийной утечке токсичного газа из помещения.

Предложенная модель позволяет прогнозировать риск токсичного поражения людей в помещениях соседних зданий. 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. Учебное пособие в 5-ти книгах / Под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаева). – М.: Изд-во АСВ, 2001. – 200 с.
2. 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. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.

Поступила в редколлегию 16.01.08 г.