

ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ ПРИ АВАРИИ С ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫМ ГРУЗОМ

На базі розробленої тривимірної чисельної моделі виконано розрахунок процесу нейтралізації токсичної речовини в атмосфері. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки. Наводяться результати обчислювального експерименту щодо прогнозу рівня забруднення атмосфери.

На основе разработанной трехмерной численной модели рассчитан процесс нейтрализации токсичных веществ в атмосфере. Модель основывается на численном интегрировании уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси. Приводятся результаты вычислительного эксперимента по прогнозу уровня загрязнения атмосферы.

The 3D CFD model to simulate the pollutant transfer and the process of neutralization of toxic gas after accidents was developed. The model is based on the transport gradient model. The results of numerical experiments are presented.

Введение

Аварии при транспортировке химически опасных грузов могут привести к значительной эмиссии опасных веществ, что приводит к масштабному загрязнению окружающей среды и создает угрозу поражения людей. При ликвидации последствий аварий с химически опасными грузами применяются различные мероприятия, в число которых входит подача нейтрализатора для локализации зоны загрязнения атмосферы [1, 5]. Очевидно, что подача нейтрализатора в зону загрязнения атмосферы может осуществляться с различных позиций, с различной интенсивностью и т.д., поэтому одним из важнейших вопросов при разработке плана организации защитных мероприятий является прогноз возможных масштабов загрязнения и количественная оценка эффективности различных средств защиты, которые могут применяться для локализации зон загрязнения, позволяющая выбрать наиболее рациональные параметры защитных установок и их размещение.

Целью работы явилось применение разработанной автором трехмерной численной модели (CFD model) для расчета процесса загрязнения атмосферы при аварийном разливе синильной кислоты и расчета процесса нейтрализации токсичного газа в атмосфере за счет подачи нейтрализующего средства. Особенностью разработанной модели является то, что она позволяет осуществлять трехмерное моделирование процессов рассеивания токсичного газа и его нейтрализации с учетом неравномерного про-

филя ветра, режима подачи нейтрализатора. Модель позволяет получить прогнозные результаты в течение нескольких секунд на ПК средней и малой мощности, что делает ее привлекательной для использования в повседневных расчетах.

Математическая модель

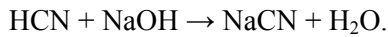
Рассматривается процесс загрязнения атмосферы при поступлении в нее HCN. Источником эмиссии является зона аварийного разлива, над которой формируется шлейф токсичного газа. Для расчета процесса загрязнения атмосферы при распространении токсичного газа, попавшего в воздушную среду вследствие аварии, используем трехмерное уравнение переноса примеси (модель градиентного типа) [2, 3]. Это же уравнение используется для моделирования рассеивания нейтрализатора (NaOH) в атмосфере, подаваемого для локализации зоны загрязнения:

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

где C – концентрация примеси (нейтрализатор, токсичный газ); u, v, w – компоненты вектора скорости воздушной среды; w_s – скорость осе-

дания примеси (нейтрализатор); $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коэффициенты атмосферной диффузии; Q – интенсивность выброса токсичного газа (нейтрализатора); $\delta(r - r_i)$ – дельта-функция Дирака; $r_i = (x_i(t), y_i(t), z_i(t))$ – координаты источника эмиссии токсичного газа (нейтрализатора).

Место эмиссии токсичного газа и место подачи нейтрализатора моделируется с помощью дельта-функции Дирака. Интенсивность эмиссии токсичного вещества определяется опытным или расчетным путем [4]. Процесс взаимодействия токсичного газа и нейтрализатора рассчитывается на основе уравнения реакции



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 ; $k_1 = 0,2$; $n = 0,16$; $m \approx 1$. Коэффициент μ_y принимается равным $\mu_y = \mu_x$ [3].

Постановка краевых условий для рассмотренного уравнения переноса примеси рассмотрена в работах [2, 3].

Метод решения

Численное интегрирование уравнения (1) проводится с использованием попеременно-треугольной разностной схемы расщепления [2] на прямоугольной разностной сетке. Разработанный код реализован на алгоритмическом языке FORTRAN.

Практическая реализация

На основе разработанного кода была решена следующая задача. Произошла авария, в результате которой образовалась зона разлива синильной кислоты, и в воздушную среду начал поступать токсичный газ – HCN – от зоны разлива. Для локализации зоны загрязнения атмосферы используется подача раствора щелочи NaOH. Исследуется эффективность процесса локализации зоны загрязнения атмосферы при различной высоте подачи нейтрализатора в эту зону и с различной интенсивностью.

Вычислительный эксперимент проводился при следующих параметрах: интенсивность

выброса HCN от зоны разлива составляет 1,2 кг/с; скорость ветра (на высоте 10 м) – 6,3 м/с; коэффициент диффузии $\mu_x = 3 \text{ м}^2/\text{с}$; скорость оседания капель нейтрализатора – 0,01 м/с; размеры расчетной области 120x120x24 м. Интенсивность подачи нейтрализатора – 1,3 кг/с (второй вариант – 2,6 кг/с). Координаты источника эмиссии NaOH: $x = 55 \text{ м}$; $y = 6,5 \text{ м}$; $z = 1 \text{ м}$. Высота подачи нейтрализатора z варьировалась: в первом сценарии она составляла 5 м, а во втором – 9 м над поверхностью земли.

При расчете полагалось, что подача нейтрализатора начинается в момент времени $t = 36 \text{ с}$. Моменту времени $t = 0$ соответствует начало эмиссии токсичного газа.

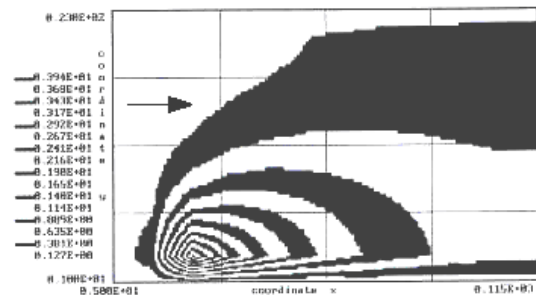


Рис. 1. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 36 \text{ с}$ (сечение $y = 55 \text{ м}$). Нет подачи нейтрализатора

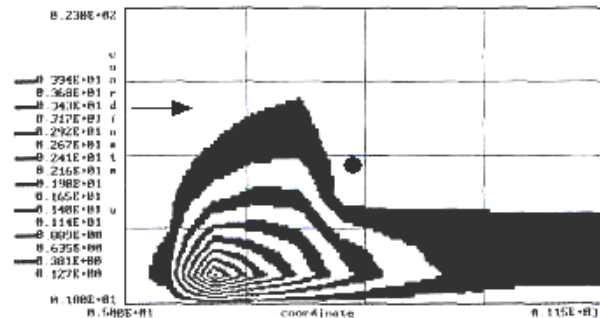


Рис. 2. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 56 \text{ с}$ (сечение $y = 55 \text{ м}$), подача нейтрализатора $Q = 1,3 \text{ кг/с}$, высота подачи $z = 9 \text{ м}$

Рассмотрим результаты расчета. В табл. 1 – 3 представлены данные по расчету количества нейтрализованного токсичного газа в зависимости от различной интенсивности подачи нейтрализатора и высоты подачи z над поверхностью земли. На основе этих данных можно количественно оценить эффективность метода нейтрализации.

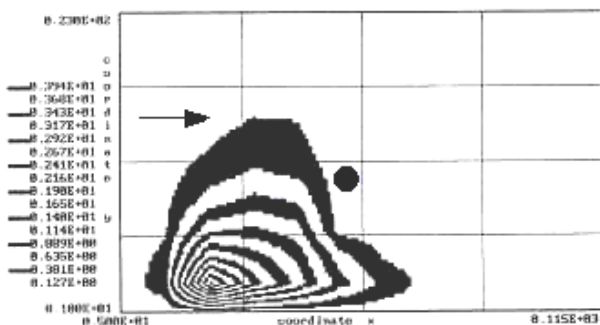


Рис. 3. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 56$ с (сечение $y = 55$ м), подача нейтрализатора $Q = 2,6$ кг/с, высота подачи $z = 9$ м

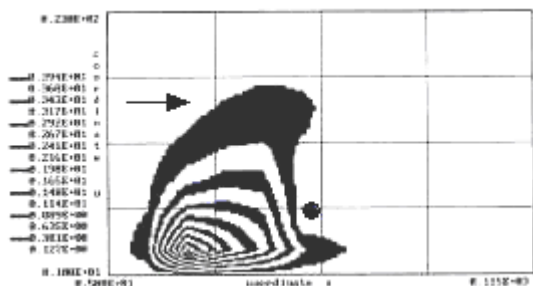


Рис. 4. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 56$ с (сечение $y = 55$ м), подача нейтрализатора $Q = 1,3$ кг/с, высота подачи $z = 5$ м

Таблица 1

Количество нейтрализованного токсичного газа, высота подачи нейтрализатора 5 м (подача нейтрализатора $Q = 1,3$ кг/с)

t, c	40	50	56
Масса, г	3308	11832	17001

Таблица 2

Количество нейтрализованного токсичного газа, высота подачи нейтрализатора 9 м (подача нейтрализатора $Q = 1,3$ кг/с)

t, c	40	50	56
Масса, г	3021	11388	16606

Таблица 3

Количество нейтрализованного токсичного газа, высота подачи нейтрализатора 9 м (подача нейтрализатора $Q = 2,6$ кг/с)

t, c	40	50	56
Масса, г	4978	18651	26384

Оценить эффективность метода нейтрализации по локализации зоны загрязнения в атмосфере можно на основе анализа представленных ри-

сунков. На рис. 1 показана зона загрязнения атмосферы перед началом процесса нейтрализации ($t = 36$ с). Хорошо видно, что возле зоны разлива сформировалась обширная область загрязнения. Видно, как шлейф токсичного газа сносится ветром. На рис. 2 – 4 представлена зона загрязнения атмосферы, но уже для различных вариантов подачи нейтрализатора. Хорошо видно, что при высоте подачи нейтрализатора $z = 9$ м над уровнем земли и при расходе нейтрализатора $1,3$ кг/с размеры зоны загрязнения атмосферы уменьшились незначительно по сравнению с ситуацией, когда нет подачи нейтрализатора (сравним рис. 2 и 1) и, в основном, это уменьшение наблюдается, начиная с высоты $z > 6$ м, где образовалась «чистая» подзона в виде «полочки». Т.е., это зона влияния источника подачи нейтрализатора. Достаточно обширная подзона загрязнения остается непосредственно над поверхностью земли (рис. 2). При уменьшении высоты подачи нейтрализатора, а также при увеличении интенсивности его подачи происходит значительное уменьшение размеров зоны загрязнения атмосферы и четкая ее локализация (рис. 3, 4). При этом исчезает зона загрязнения непосредственно над поверхностью земли.

Поскольку при авариях с химически опасными веществами поражающим фактором является концентрация загрязнителя, то практически важным вопросом является расчет ее величины в тех или иных зонах, например с целью выбора безопасного расположения людей, техники и т.п. В табл. 4 – 7 показано прогнозное значение концентрации токсичного газа на различном расстоянии от места эмиссии при отсутствии подачи нейтрализатора и при его подаче (сечение $y = 55$ м). Эти данные позволяют также оценить эффективность процесса нейтрализации по локализации зоны загрязнения.

Таблица 4

Концентрация токсичного газа на различном расстоянии от зоны разлива, уровень $z = 3$ м (нет подачи нейтрализатора)

x, m	30	40	50
Концентрация, $г/м^3$	1,12	0,907	0,753

С практической точки зрения представляет интерес прогноз динамики изменения концентрации токсичного газа на различном расстоянии от зоны разлива при подаче нейтрализатора. Такая информация позволяет определить время, когда будут образованы безопасные зо-

ны и их размеры. В табл. 8 представлены данные по расчету этой динамики для сценария: $z = 9$ м – высота подачи нейтрализатора, интенсивность подачи – 2.6 кг/с.

Таблица 5

Концентрация токсичного газа на различном расстоянии от зоны разлива, уровень $z = 3$ м (высота подачи нейтрализатора 5 м, подача нейтрализатора $Q = 1,3$ кг/с)

x , м	30	40	50
Концентрация, г/м ³	0,0	0,003	0,025

Таблица 6

Концентрация токсичного газа на различном расстоянии от зоны разлива, уровень $z = 3$ м (высота подачи нейтрализатора 9 м, подача нейтрализатора $Q = 1,3$ кг/с)

x , м	30	40	50
Концентрация, г/м ³	0,795	0,502	0,345

Таблица 7

Концентрация токсичного газа на различном расстоянии от зоны разлива, уровень $z = 3$ м (высота подачи нейтрализатора 9 м, подача нейтрализатора $Q = 2.6$ кг/с)

x , м	30	40	50
Концентрация, г/м ³	0,468	0,096	0,0

Таблица 8

Изменение с течением времени концентрации (г/м³) токсичного газа на различном расстоянии от зоны разлива, уровень $z = 3$ м, сечение $y = 55$ м (подача нейтрализатора $Q = 2.6$ кг/с, $z = 9$ м)

t	38 с	40 с	50 с	56 с
20 м	1,39	1,36	1,33	1,33
30 м	0,80	0,59	0,47	0,46
40 м	0,69	0,38	0,10	0,09
50 м	0,65	0,37	0,0	0,0

Принимая во внимание, что значение концентрации 1 г/м³ является смертельно опасной величиной при загрязнении воздуха HCN, мы

видим, что зона смертельного поражения находится примерно на расстоянии 25 м от источника эмиссии при подаче нейтрализатора.

В заключение отметим, что расчет с использованием построенной численной модели требует около 5...10 с для получения результатов с помощью разработанного кода.

Выводы

В работе на основе разработанной трехмерной численной модели и созданного на ее основе кода выполнен расчет процесса нейтрализации токсичного газа в атмосфере. Методом вычисленного эксперимента исследована эффективность процесса нейтрализации и локализации зоны загрязнения в атмосфере при различной интенсивности подачи нейтрализатора и места его подачи. Дальнейшее развитие данной модели должно быть направлено на создание численной модели для расчета рассеивания тяжелых газов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий [Текст] : учеб. пособие в 5-ти кн. / под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаева). – М.: Изд-во АСВ, 2001. – 200 с.
2. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский и др. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
3. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
4. Мацак, В. Г. Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве [Текст] / 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 [Текст]. – К., 2001. – 33 с.
6. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 616 с.

Поступила в редколлегию 17.09.2009.

Принята к печати 23.09.2009.