

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕГАЗАЦИИ ПОМЕЩЕНИЯ ПОСЛЕ АВАРИИ

Запропонована чисельна модель та на її базі розроблено метод розрахунку процесу розповсюдження токсичного газу в приміщенні. Як математична модель використовуються тривимірні рівняння переносу домішки та потенціального руху повітря. Розрахунок здійснюється з використанням неявних різницьових схем. Надаються результати обчислювального експерименту з моделювання забруднення повітря у приміщенні після аварійного викиду токсичної речовини.

Разработана численная модель и на ее основе построен метод расчета процесса распространения токсичного газа в помещении. В качестве математической модели используются трехмерные уравнения переноса примеси и потенциального течения воздушной среды. Расчет осуществляется с использованием неявных разностных схем. Приводятся результаты вычислительного эксперимента по моделированию загрязнения воздушной среды в помещении после выброса токсичного вещества.

A numerical model to simulate the process of pollutant transfer in rooms was developed. The numerical simulation is carried out using 3D models of pollutant transfer and potential flow. The implicit finite difference schemes are used. The results of numerical simulation of air pollution after blasts in industrial rooms are presented.

При аварийных выбросах ряда токсичных веществ в производственных помещениях во многих случаях существует угроза возникновения вторичной аварии, если концентрации загрязнения превысит нижний концентрационный предел и рядом будет источник воспламенения (нагретая поверхность, открытое пламя) [1; 2; 6]. Потому максимально быстрое снижения концентрации загрязняющего вещества в помещении после аварии – особо важная задача.

Снижение уровня загазованности помещения (дегазация) может быть выполнено как за счет работы аварийной вентиляции, так и за счет применения подачи нейтрализующего раствора в помещение через спринклер. В этом случае можно рекомендовать такую схему подачи: насос (рис. 1) забирает нейтрализующий раствор из емкости и подает по трубопроводу в помещение, где произошла авария. Через систему распределительных трубопроводов, вдоль которых размещены спринклеры, нейтрализующий раствор поступает в помещение и при воздействии с токсичным газом происходит процесс дегазации. При наличии газовых анализаторов в помещении и системы автоматики, в работу может «включаться» та ветвь распределительного трубопровода (и даже отдельно взятый спринклер), которая наиболее близко располагается к месту аварийного выброса.

Анализ литературных источников показал отсутствие публикаций, посвященных проблеме расчета процессов дегазации помещений при использовании подачи в них нейтрализующих растворов. Приведенные в научных

публикациях [6] методы расчета аварийной вентиляции основываются на балансовых соотношениях или на использовании аналитического решения одномерного уравнения переноса примеси. Эти методы не могут быть применены для теоретического исследования процессов дегазации с учетом пространственного размещения в помещении технологического оборудования, различного положения спринклеров, различного положения приточно-вытяжных отверстий. Поэтому целью данной работы явилось создание метода расчета процессов вентиляции и дегазации помещений после аварий с учетом основных физических факторов, влияющих на процесс миграции примеси в помещении. Разработанный метод расчета основывается на создании трехмерной численной модели изучаемого процесса.

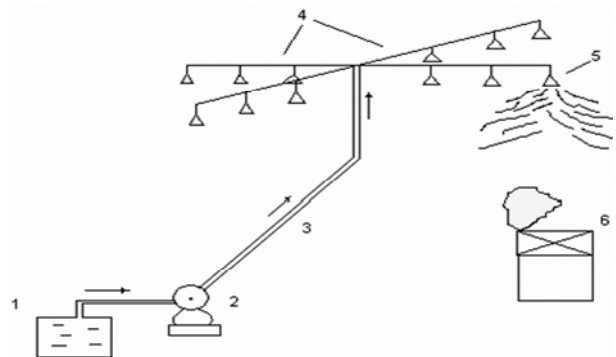


Рис. 1. Схема спринклерной установки:  
1 – емкость с нейтрализующим раствором; 2 – насос;  
3 – трубопровод; 4 – распределительные трубопроводы;  
5 – спринклер; 6 – место аварийного выброса

**Математическая модель.** Для моделирования процесса переноса загрязняющего вещества (нейтрализатора) в помещении будем использовать трехмерное уравнение миграции примеси [3; 4]

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

где  $C$  – концентрация загрязняющего вещества (нейтрализатора) в помещении;  $u, v, w$  – 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 (нейтрализатора) в помещении;  $\delta(r-r_i)$  – дельта-функция Дирака;  $r_i = (x_i, y_i, z_i)$  – координаты источника выброса.

Для расчета поля скорости воздушного потока в помещении, индуцированного работой вентиляции, делается допущение, что движение воздушной среды в помещении 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 (условия Дирихле)

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

**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  $\tau$  – 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 расчета вентиляции помещения после аварии на примере решения следующей задачи. В производственном помещении (рис. 2) в результате аварии произошел залповый выброс  $\text{NH}_3$ , в результате которого в помещении образовалось облако токсичного газа. Поэтому в качестве начального условия (при  $t = 0$ ) задается местоположение облака, его форма, размеры и концентрация загрязнителя.

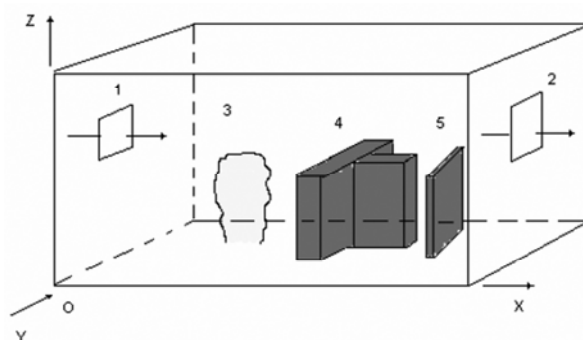


Рис. 2. Схема помещения:

- 1 – приточное отверстие; 2 – вытяжное отверстие;  
3 – облако токсичного газа; 4, 5 – оборудование

В помещении располагается технологическое оборудование: первый технологический агрегат имеет т-образную форму, а второй – форму параллелепипеда (рис. 3). Для вентиляции помещения после аварии используется подача воздуха, с известным расходом  $Q$ . Приточное и вытяжное отверстия располагаются на противоположных стенах помещения. Требуется исследовать динамику процесса вентиляции помещения после

аварии. Вычислительный эксперимент был проведен для таких параметров: облако  $\text{NH}_3$  имеет размеры:  $5 \times 3 \times 5$  м; воздухообмен –  $2,8 \text{ м}^3/\text{с}$ ; размеры помещения  $10 \times 10 \times 4$  м; коэффициент диффузии  $\mu = 0,06 \text{ м}^2/\text{с}$ ; начальная концентрация  $\text{NH}_3$  в облаке (при  $t = 0$ ) составляет:  $C_0 = 0,17 \text{ г}/\text{м}^3$ .

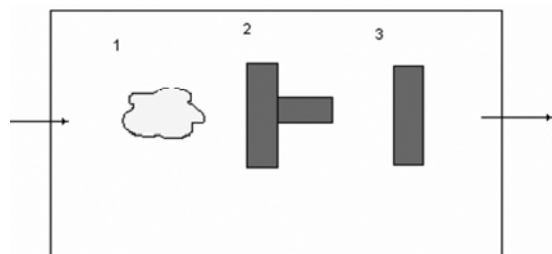
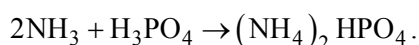
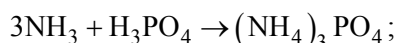


Рис. 3. План помещения

На первом этапе вычислительного эксперимента исследуется процесс проветривания помещения исключительно за счет работы аварийной вентиляции, а на втором этапе – за счет работы аварийной вентиляции и подачи в помещение нейтрализатора (ортофосфорной кислоты) для дегазации. Источник подачи нейтрализатора (спринклер) располагается в точке с координатами  $x = 6$  м;  $y = 5$  м;  $z = 3$  м.

Подача нейтрализатора составляет –  $100 \text{ г}/\text{с}$  и осуществляется на временном интервале  $10 \dots 25$  с. Процесс взаимодействия токсичного вещества и нейтрализатора описывается соотношениями:



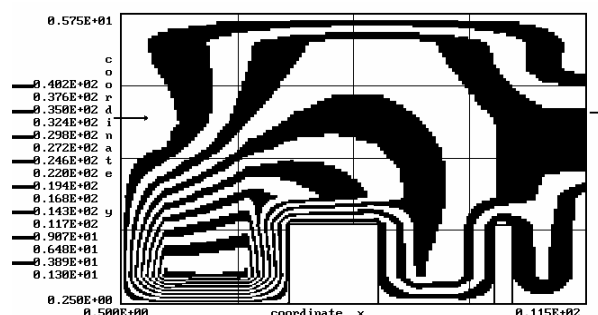
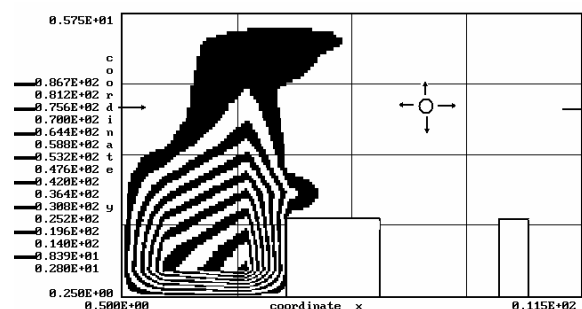
Расчет химического взаимодействия «токсичное вещество + нейтрализатор» осуществляется в отдельном программном модуле, что позволяет быстро «переориентировать» разработанный пакет прикладных программ на решение задачи, связанной с выбросом другого токсичного вещества, для нейтрализации которого нужен иной нейтрализатор.

Рассмотрим результаты вычислительного эксперимента. В таблице представлены расчетные значения величины максимальной концентрации токсичного газа в помещении после аварии. Результаты представлены для двух рассматриваемых случаев, т. е. для случая простого проветривания помещения и для случая «вентиляция + подача нейтрализатора». Из таблицы видно, что подача кислоты позволяет значительно быстрее уменьшить загазованность помещения и, следовательно, снизить риск вторичной аварии.

Величина максимальной концентрации токсичного газа в помещении

$t, \text{ с}$	$C_{\text{max}}, \text{ г}/\text{м}^3$ (без подачи нейтрализатора)	$C_{\text{max}}, \text{ г}/\text{м}^3$ (при подаче нейтрализатора)
4	0,144	0,144
8	0,105	0,105
10	0,091	0,091
16	0,064	0,056
20	0,054	0,041
28	0,042	0,011
30	0,040	0,008
32	0,038	$0,1 \cdot 10^{-6}$

На приведенных ниже рисунках показана динамика формирования зоны загрязнения в помещении для каждого этапа вычислительного эксперимента. Так, рис. 4, 5 иллюстрируют процесс формирования зоны загрязнения, когда работает только аварийная вентиляция, а на рис. 6–8 показана динамика изменения зоны загрязнения при работе вентиляции и подаче нейтрализатора. Отчетливо видно, как подача нейтрализатора существенно уменьшает размеры зоны загрязнения помещения токсичным газом.

Рис. 4. Зона загрязнения помещения для момента времени  $t = 32$  с (нет подачи нейтрализатора)Рис. 5. Зона загрязнения помещения для момента времени  $t = 11,2$  с (идет подача нейтрализатора)

## Выводы

В работе разработана трехмерная численная модель, на основе которой построен метод расчета динамики миграции загрязняющего вещества в помещении после аварийного выброса токсичного вещества. На основе разработанной модели создан метод расчета дегазации помещения путем подачи в него нейтрализующего раствора. Как показало проведенное исследование подача нейтрализующего раствора значительно ускоряет процесс дегазации помещения при достаточно малом воздухообмене.

Сокращение времени дегазации за счет нейтрализации токсичного газа позволяет значительно снизить вероятность вторичной аварии и токсичного поражения обслуживающего персонала. Дальнейшее совершенствование данного направления необходимо вести по созданию банка данных для компьютерных моделей относительно наиболее типичных загрязнителей и нейтрализующих их растворов для того или иного вида производства.

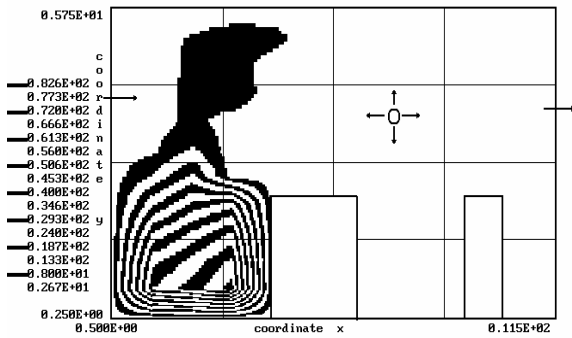


Рис. 6. Зона загрязнения помещения для момента времени  $t = 11$  с (идет подача нейтрализатора)

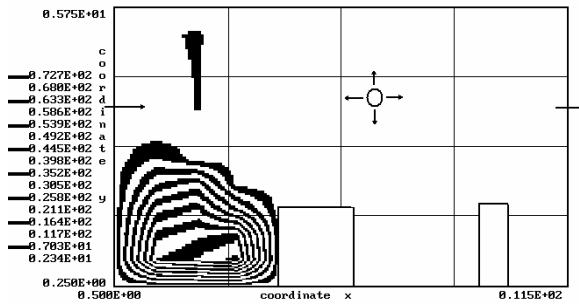


Рис. 7. Зона загрязнения помещения для момента времени  $t = 14$  с (идет подача нейтрализатора)

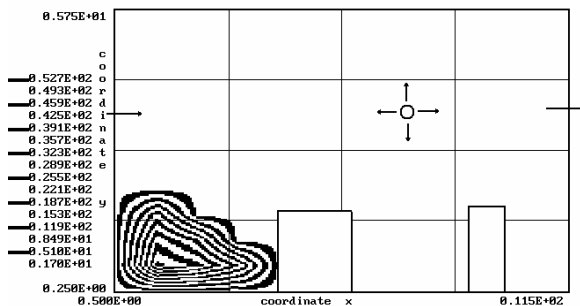


Рис. 8. Зона загрязнения помещения для момента времени  $t = 18$  с (идет подача нейтрализатора)

Таким образом, использование метода подачи нейтрализующих растворов для дегазации помещений может значительно повысить степень экологической безопасности опасных производств, где риск аварийных выбросов токсичных веществ в воздушную среду помещений очень велик.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: Учебное пособие в 5-ти кн. / Под ред. Котляревского В. А. и Забегаева А. В. – М.: Из-во АСВ, 2001. – 200 с.
2. Демидов П. Г. Горение и свойства горючих веществ. М.: Из-во министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1962. – 254 с.
3. Згуровский М. 3.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.
4. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука. – 1982. – 320 с.
5. Самарский А. А. Теория разностных схем. 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
6. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств. 3-е изд., перераб. – М.: Химия, 1980. – 288 с.

Поступила в редколлегию 17.03.2006.