

АВАРИЯ НА ХИМИЧЕСКИ ОПАСНОМ ОБЪЕКТЕ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ТОКСИЧНОГО ГАЗА НАД КРЫШЕЙ ЗДАНИЯ

На основе 2D разработанной численной модели выполнен расчет процесса нейтрализации токсичного газа при его выходе через пролом в крыше. Для подачи нейтрализатора используется вертолет. Модель основывается на численном интегрировании уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси и на модели невязкой несжимаемой жидкости. Приводятся результаты вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: авария на химическом объекте, нейтрализация токсичного газа

Введение

На территории химически опасных промышленных объектов аварии могут происходить внутри производственных помещений и сопровождаться при этом частичным разрушением зданий – например, появлением пролома в крыше здания. В этом случае загрязнитель (токсичный газ, продукты горения при пожаре) может поступать в атмосферу через этот образовавшийся пролом. Таким образом, источник выброса опасных веществ находится внутри здания. Если рассматривать данную задачу с точки зрения локального прогноза уровня загрязнения атмосферы (т.е. в рамках промышленной площадки объекта) то крайне важно при таком прогнозе учесть эту особенность выброса, т.к. вблизи здания возможно формирование застойных зон загрязнения, где возможен взрыв. Такой учет необходим для оценки риска поражения персонала непосредственно на промышленном объекте, определения безопасных зон для размещения аварийно-спасательных бригад, оценки безопасности маршрутов эвакуации. Но особенно важно осуществить такой учет, если поставлена задача локализации источника выброса на крыше здания, например, путем нейтрализации токсичных веществ, выходящих из пролома. Эффективная локализация источника выброса приведет к существенному уменьшению размеров зоны загрязнения, а значит и к снижению риска поражения людей. Подача нейтрализатора, при выбросе токсичных газов на крыше здания, может происходить от вертолета, поскольку использование другой техники в данной ситуации - затруднено или невозможно (рис. 1). Примером является подача воды с вертолета на крышу здания при аварии на АЭС Фукусима-1. Совершенно очевидно, что воздействие ветрового потока, атмосферной диффузии приведет к сносу реагента

и, в результате, эффективность нейтрализации может быть крайне низкой. Учитывая сложность постановки и проведения физического эксперимента для исследования такого многофакторного процесса, становится понятным, что единственным теоретическим инструментом решения данной задачи есть вычислительный эксперимент на базе численной модели изучаемого процесса [1 – 7]. Вопросы построения математических процесса нейтрализации токсичного газа в атмосфере для различных способов подачи реагента (от наземных средств, вертолета) и их практической реализации достаточно подробно рассмотрены в работах [3, 4, 7]. Анализ литературных источников показал отсутствие математических моделей, предназначенных для решения задач данного класса в условиях выброса опасных веществ, на крыше частично разрушенных зданий. В этой связи, особую актуальность приобретает разработка математических моделей процесса нейтрализации токсичных газов для такой аварийной ситуации, позволяющих рассчитать эффективность этого процесса для различных сценариев подачи реагента, метеоусловий, особенностей выброса и при этом требующих небольших затрат времени при реализации кода на ПК малой и средней мощности.

Целью настоящей работы является построение численной модели и кода для решения задачи по оценке эффективности нейтрализации зоны загрязнения на крыше здания при подаче реагента от вертолета..

Математическая модель загрязнения атмосферы

Будем считать, что при аварии в здании химически опасного объекта произошло частичное разрушение крыши, и в ней образовался пролом (рис. 2). Через этот пролом в атмосферу стал поступать токсичный газ из здания. Для

нейтрализации газа применяется подача реагента от вертолета. Место подачи реагента известно. Образовавшийся в крыше пролом будем моделировать выемкой заданной формы. Форма крыши и выемки формируется в численной модели с помощью техники «porosity technique» [9].

Для моделирования процесса переноса токсичного газа в выемке и над крышей здания при его выходе из пролома, а также для моделирования переноса нейтрализатора будем использовать уравнение миграции примеси, осредненное по ширине расчетной области [2 – 4]

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + \sum Q_i(t) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i), \end{aligned} \quad (1)$$

где C – осредненное значение концентрации примеси (токсичный газ, нейтрализатор);

u, v – компоненты вектора скорости течения воздушной среды;

μ_x, μ_y – коэффициенты диффузии;

x_i, y_i – координаты расположения точечного источника выделения примеси – нейтрализатора (ось Y направлена вертикально вверх);

w – скорость оседания примеси;

$Q_i(t)$ – интенсивность поступления нейтрализатора в воздушную среду от вертолета;

$\delta(x-x_i) \delta(y-y_i)$ – обозначение дельта-функции Дирака.

В построенной численной модели метеорологические параметры – профиль скорости ветра на входе в расчетную область, коэффициенты атмосферной диффузии рассчитываются по зависимостям [5, 6]

$$\begin{aligned} u &= u_1 \left(\frac{y}{y_1} \right)^n; \\ \mu_y &= 0,11y; \\ \mu_x &= 0,2 u(x, y), \end{aligned}$$

где u_1 – значение скорости ветра на высоте $y_1 = 10$ м; $n = 0,15$.

Постановка краевых условий для уравнения (1) рассмотрена в работах [9, 8].

Отметим, что на дне пролома (рис. 2, нижняя граница выемки) задается скорость газово-

го потока и концентрация загрязнителя в этом потоке.

Модель гидродинамики

С гидродинамической точки зрения мы имеем задачу о взаимодействии набегающего потока воздуха (ветра) с газовым потоком – загрязнителем, выходящим из пролома в крыше. Данная задача относится к классу задач «о вдуве струи в сносящий поток» [6]. Для расчета поля скорости при взаимодействии двух потоков делается допущение, что движение воздушной среды – потенциальное [3, 5], тогда компоненты скорости воздушной среды определяются соотношениями

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial P}{\partial y},$$

где P – потенциал скорости.

Уравнение для определения потенциала скорости имеет вид

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

Для уравнения (2) ставятся следующие граничные условия:

- на твердых стенках –

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0,$$

где n – единичный вектор внешней нормали;

- на границах втекания воздушного потока и токсичного газа – вида

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

где V_n – известное значение скорости воздушного потока (или токсичного газа на нижней границе пролома);

- на выходной границе

$$P = P(x = \text{const}, y) + \text{const} \quad (\text{условия Дирихле}).$$

Верхняя граница расчетной области – твердая стенка.

Метод решения

Численное интегрирование уравнения (1) осуществляется с использованием неявной попеременно-треугольной разностной схемы расщепления [8]. Для численного интегрирования уравнения (2) используется метод Либмана. На базе построенной численной модели разрабо-

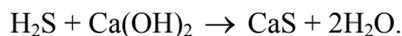
тан код *AIRDEF*, реализованный на алгоритмическом языке FORTRAN.



Рис. 1. Подача воды от вертолета

Практическое применение численной модели

Разработанный код был применен для решения следующей задачи. Рассматривается выброс токсичного газа (H_2S) через пролом в крыше цеха (рис. 3). Скорость газового потока составляет 12 м/с на дне выемки. Скорость ветра на уровне крыши – 5 м/с. Концентрация сероводорода в газовом потоке, на дне пролома – 5 г/м³. Для нейтрализации газа используется подача с вертолета реагента – раствора $Ca(OH)_2$, интенсивность подачи – 200 кг/с, $w = 0$. Реакция взаимодействия нейтрализатора и токсичного газа описывается уравнением:



В разработанном коде процесс нейтрализации рассчитывается в отдельной подпрограмме, что позволяет применять код для расчета нейтрализации любого другого токсичного газа и при использовании другого нейтрализатора. Время начала подачи реагента t_0 с вертолета, позиция источника выброса реагента – емкости, которая располагается на тросе, прикрепленном к вертолету, а также маршрут движения вертолета, режим подачи реагента задается в файле исходных данных.

При проведении вычислительного эксперимента варьировалось место выброса нейтрализатора относительно проема в крыше, из которого выходил токсичный газ. Результаты моделирования представлены на последующих рисунках. На рис. 3 показана зона загрязнения на крыше здания для условия, когда отсутствует подача нейтрализатора. В данном случае зона загрязнения представляет собой шлейф, расширяющийся вдоль направления движения ветро-

вого потока. Форма зоны загрязнения существенно меняется, если происходит подача нейтрализатора. На рис. 4 показана зона загрязнения атмосферы, когда подача реагента происходит непосредственно над выемкой. Отчетливо видно, что в этом случае ширина зоны загрязнения резко уменьшилась и зона загрязнения представляет собой узкую полосу, прижатую к крыше здания. На рис. 5 показана зона загрязнения воздушной среды в случае, когда подача реагента происходит на уровне верхней границы выемки. Видно, что в данном случае произошло изменение формы зоны загрязнения уже внутри выемки, что обусловлено «входом» реагента внутрь данной полости. Хорошо заметна зона влияния источника подачи нейтрализатора, которая оказывается меньше ширины выемки и поэтому «часть» токсичного газа выходит из выемки и образует подзону загрязнения в виде «холма» возле левой стороны выемки. Зона загрязнения справа от выемки продолжает существовать и имеет вид узкой полосы. На рис.6 изображена зона загрязнения для случая, когда источник подачи реагента опущен внутрь выемки. В данном случае зона загрязнения справа от выемки - отсутствует, а слева от выемки зона загрязнения имеет вид «холма», но уже большего размера, чем в предыдущем случае.

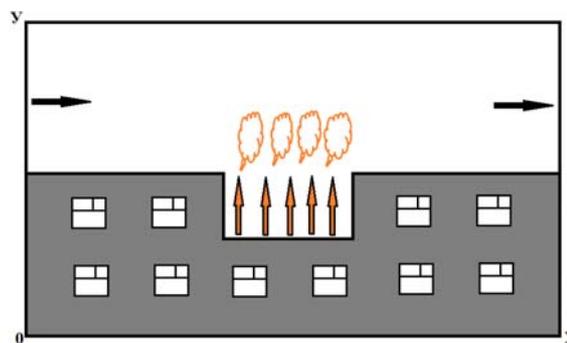


Рис. 2. Схема пролома в крыше здания и выхода токсичного газа в атмосферу

На рис. 7 представлена зона загрязнения атмосферы для случая, когда выемка, образовавшаяся в здании при аварии, имеет сложную геометрическую форму – в виде трапеции. Подача нейтрализатора происходит возле правой стороны выемки. Так как емкость, из которой осуществляется подача нейтрализатора, находится на определенной высоте от крыши, то часть загрязнителя проходит под этой емкостью и, в данном случае, зона загрязнения, по ветру, представляет собой достаточно широкую полосу, вытянутую вдоль крыши здания. Хорошо видно, что непосредственно перед источ-

ником подачи реагента формируется достаточ- но обширная подзона загрязнения в виде «хол- ма».

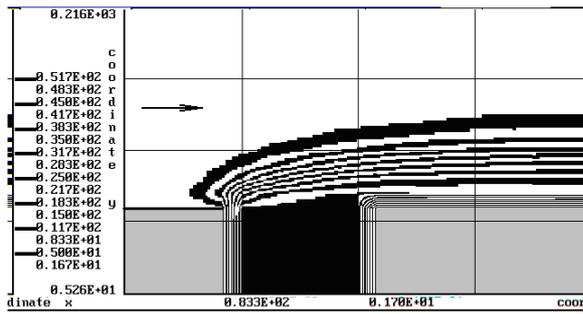


Рис. 3. Зона загрязнения атмосферы над крышей здания для момента времени $t = 250$ с (нет подачи нейтрализатора)

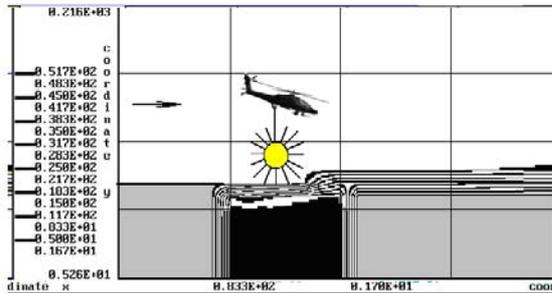


Рис. 4. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 250$ с (происходит подача нейтрализатора над проломом)

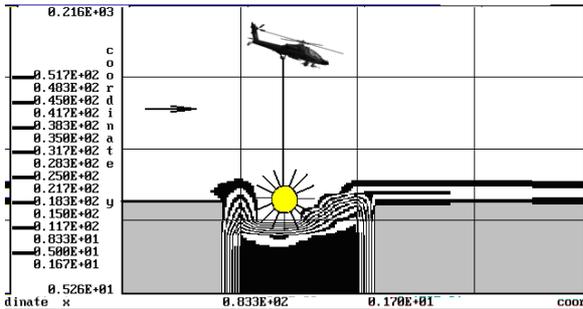


Рис. 5. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 250$ с (происходит подача нейтрализатора на уровне верхней границы пролома)

В заключение отметим, что расчет каждого варианта задачи требует около 10 секунд компьютерного времени.

Выводы

В работе рассмотрено численное решение задачи по нейтрализации в атмосфере токсичного газа, выходящего из пролома в крыше здания. Разработана численная модель процесса нейтрализации, на основе которой создан специализированный код. Построенная численная модель дает возможность оценить эффек-

тивность данного метода защиты атмосферы от загрязнения с учетом влияния на этот процесс основных физических факторов. Модель может быть использована для оптимизации процесса защиты атмосферы от загрязнения при подаче нейтрализатора от вертолета или какого-либо другого устройства. Дальнейшее совершенствование данного направления необходимо вести по созданию 3D численной модели процесса нейтрализации.

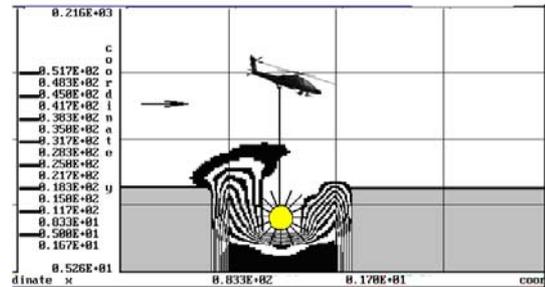


Рис. 6. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 250$ с (происходит подача нейтрализатора внутри пролома)

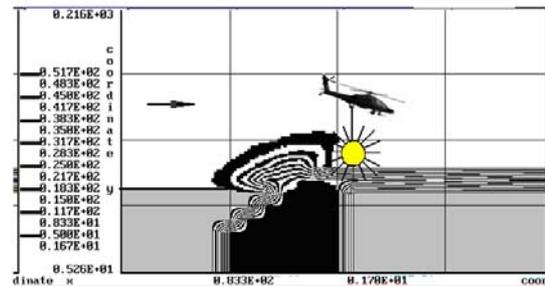


Рис. 7. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 250$ с (происходит подача нейтрализатора сбоку от пролома). Пролом в крыше имеет сложную форму

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен [Текст] / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990. – 725 с.
2. Беляев, Н. Н. Расчет распространения загрязняющих веществ в условиях застройки [Текст] / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 18. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 21–24.
3. Беляев, Н. Н. Защита атмосферы от загрязнения при миграции токсичных веществ [Текст] / Н. Н. Беляев, В. М. Лисяк. – Д.: Изд-во «Інновація», 2006. – 149 с.
4. Беляев Н. Н. Нейтрализация облака токсичного газа в атмосфере [Текст] / Н. Н. Беляев, В. М. Лисяк // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 29. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 91–95.

5. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы [Текст] / М. Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеоздат, 1985. – 273 с.
6. Бруцкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов [Текст] / Е. В. Бруцкий. – К.: Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
7. Лисняк, В. М. Защита атмосферы при аварии с химическим опасным грузом [Текст] / В. М. Лисняк // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2009. – Вип. 28. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 73–76.
8. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский [и др.]. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
9. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
10. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
11. Mahfound, Kadja. Computation of Wind Flow and Air Pollution for Regions Having a Complex Topography [Text] / Kadja Mahfound, Anagnostopoulos [et al.] // Proc. of 3rd European & African Conf. on Wind Engineering (Eindhoven Univ. of Technology, Netherlands, July 2 – 6, 2001). – P. 355-358.

Поступила в редколлегию 31.10.2011.
Принята к печати 03.11.2011.

М. М. БІЛЯЄВ, В. М. ЛИСНЯК

АВАРІЯ НА ХІМІЧНО НЕБЕЗПЕЧНОМУ ОБ'ЄКТІ: ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ТОКСИЧНОГО ГАЗУ НАД ДАХОМ БУДІВЛІ

На базі побудованої 2D чисельної моделі виконано розрахунок процесу нейтралізації токсичного газу при його виході з пролому в стелі. Подача нейтралізатора здійснюється з гелікоптера. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки та моделі течії нестислої рідини. Наводяться результати обчислювального експерименту.

Ключові слова: аварія на хімічному об'єкті, нейтралізація токсичного газу

N. N. BELYAEV, V. M. LISNYAK

ACCIDENT AT CHEMICALLY HAZARDOUS ENTERPRISES: NUMERICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF NEUTRALIZING THE TOXIC GAS OVER THE BUILDING ROOF

The 2D numerical model was used to simulate the toxic gas neutralization when this gas flows from the opening in the cellar of the building. The helicopter is used to supply the neutralizer. The model is based on the *K*-gradient transport model and equation of potential flow. The results of numerical experiment are presented.

Keywords: accident on the chemical enterprise, toxic gas neutralization