

МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЦЕССА НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ТОКСИЧНОГО ОБЛАКА, МИГРИРУЮЩЕГО В АТМОСФЕРЕ

Запропонований новий метод розрахунку процесу нейтралізації хмари аміака за рахунок подачі суміші з гелікоптера. Метод базується на побудові чисельної моделі процесу. Як модель використовується тривимірне рівняння переносу домішок. Розрахунок здійснюється за допомогою неявної різницевої схеми.

Предложен новый метод расчета процесса нейтрализации облака аммиака за счет подачи раствора с вертолета. Метод базируется на построении численной модели процесса. В качестве модели используется трехмерное уравнение переноса примесей. Расчет выполняется с помощью неявной разностной схемы.

A new method to calculate the process to NH_3 cloud neutralization which is discharged from a helicopter. The method is based on the numerical model of the process. To simulate the process the 3D gradient model is used. The implicit difference scheme is used for calculation.

Введение

Как известно, при разливе жидкого аммиака (перегретая жидкость) в первые моменты времени после аварии образуется первичное облако. Масса аммиака, которая формирует это облако, зависит от метеоусловий и ряда других факторов [1; 3; 6] и в среднем составляет 10...20 % от общей массы разлитого груза.

Опасность токсичного поражения людей при миграции первичного облака отравляющего вещества требует разработки эффективных технологий по ликвидации такого облака. Одним из методов, наиболее часто применяемом на практике, является подача в облако воды, нейтрализующего раствора от наземной струйкой установки. В этом случае обычно используются пожарные машины, в силу своей мобильности позволяющие «перехватить» облако на пути его следования. Однако во многих случаях применение наземных струйных установок может быть практически неосуществимо. Эта ситуация возникает в условиях сложного рельефа местности, наличия растительности и т. д. Как альтернатива, для ликвидации первичного облака, уменьшения его интенсивности в таких случаях может быть применены летательные аппараты, в частности, вертолеты, которые осуществляют подачу нейтрализатора в облако (рис. 1). Как известно, такая технология используется во многих странах для борьбы с лесными, торфяными пожарами [4–6].

Анализ литературных источников, посвященных проблеме нейтрализации первичного облака аммиака или другого токсичного газа с помощью воздушных средств, показал, что в литературе дается описание данного метода, однако, отсутствуют методы расчета, которые

можно было бы применить для решения задачи по оптимизации работ, связанных с нейтрализацией первичного облака. Целью настоящей работы является разработка математической модели и метода расчета нейтрализации токсичного облака путем численного моделирования данного процесса в рамках трехмерного уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси в атмосфере.

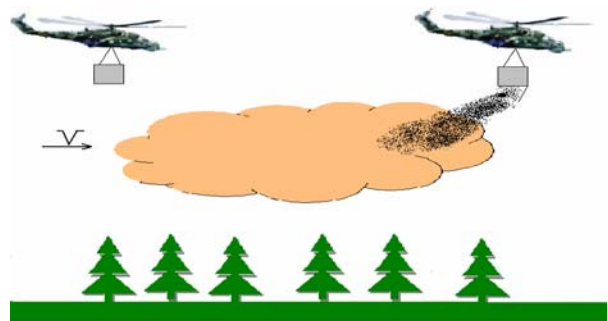


Рис. 1. Схема ликвидации облака аммиака

Метод позволяет на основе вычислительно-эксперимента в режиме реального времени решать следующие актуальные задачи:

1. Прогнозировать динамику загрязнения атмосферы при миграции первичного облака аммиака в рамках трехмерной модели.

2. Оценивать эффективность нейтрализации первичного облака при сбросе в него нейтрализатора от вертолета с учетом метеоусловий, маршрута движения летательного аппарата, концентрации нейтрализующего раствора, режима подачи нейтрализатора.

3. Определять количество нейтрализованного аммиака в воздухе при выбранной тактике обработки (маршрут, интенсивность выброса и т. д.).

Математическая модель миграции аммиака и нейтрализатора в воздухе

Для описания миграции облака аммиака (или нейтрализатора) используется трехмерное уравнение переноса примеси

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u\varphi}{\partial x} + \frac{\partial v\varphi}{\partial y} + \frac{\partial w\varphi}{\partial z} + \sigma\varphi = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \sum q_i(t) \delta(r - r_i) \quad (1),$$

где φ – концентрация аммиака (нейтрализатора) в единице объема воздуха; u, v, w – компоненты вектора скорости ветра; $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коэффициенты турбулентной диффузии; t – время; σ – коэффициент, учитывающий испарения нейтрализатора; $r_i = (x_i, y_i, z_i)$ – координаты источника выброса нейтрализатора; q_i – мощность выброса нейтрализатора в атмосферу; $\delta(r - r_i), \delta(r - r_j)$ – дельта-функция Дирака.

Уравнение (1) дополняется следующими граничными условиями: на поверхности земли

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$$

(n – вектор внешней нормали к поверхности); на боковых гранях расчетной области ставятся условия:

$$\varphi = 0 \quad \text{при} \quad (\vec{V} \cdot \vec{n}) \geq 0;$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad \text{при} \quad (\vec{V} \cdot \vec{n}) \leq 0.$$

Начальное условие имеет вид $\varphi = 0$ (для нейтрализатора), для аммиака задается его концентрация в первичном облаке. В модели учитывается процесс осаждения капель нейтрализатора под действием силы гравитации со скоростью w_s , путем добавления слагаемого $-w_s\varphi$ в модель (1), в слагаемое, учитывающее конвективный перенос со скоростью ветра w .

Метод решения

Численное интегрирование уравнения переноса аммиака или нейтрализатора осуществляется с использованием неявной попеременно-треугольной разностной схемы расщепления [2].

На каждом дробном шаге расчет неизвестного значения концентрации загрязняющего вещества выполняется по схеме бегущего счета. Разностная схема является абсолютно устойчивой.

Выполним следующую аппроксимацию производных, входящих в уравнение (1):

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t};$$

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x};$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y};$$

$$\frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z};$$

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{ijk}^{n+1} - u_{ijk}^+ C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{ijk}^- C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

где

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}; \quad u^- = \frac{u - |u|}{2} \quad \text{и т. д.}$$

Компоненты скорости потока будем задавать на гранях разностной ячейки. Вторые производные аппроксимируем следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \tilde{\mu}_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x^2} -$$

$$- \tilde{\mu}_x \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}.$$

В используемых выражениях $L_x^+, L_x^-, M_{xx}^+, M_{xx}^-$, – обозначения разностных операторов. С учетом этих обозначений разностный аналог уравнения (1) будет иметь вид:

$$\frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} +$$

$$+ L_z^+ C^{n+1} + L_z^- C^{n+1} + \sigma C_{ijk}^{n+1} = (M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} +$$

$$+ M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1} + M_{zz}^- C^{n+1}).$$

Решение данного разностного уравнения при интегрировании на временном интервале dt так:

- на первом шаге $k = \frac{1}{4}$

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k + L_z^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ijk}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n + \\ + M_{zz}^+ C^k + M_{zz}^- C^n); \end{aligned}$$

- на втором шаге $k = n + \frac{1}{2}$; $c = n + \frac{1}{4}$

$$\begin{aligned} \frac{C_{ijk}^k - C_{ijk}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k + L_z^- C^k) + \\ \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + \\ + M_{yy}^+ C^c + M_{zz}^- C^k + M_{zz}^+ C^c); \end{aligned}$$

- на третьем шаге $k = n + \frac{3}{4}$; $c = n + \frac{1}{2}$

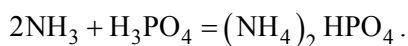
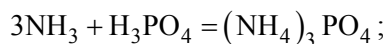
$$\begin{aligned} \frac{C_{ijk}^k - C_{ijk}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k + L_z^+ C^k) + \\ + \frac{\sigma}{4} C_{ijk}^k = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + \\ + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c + M_{zz}^- C^c + M_{zz}^+ C^k); \end{aligned}$$

- на четвертом шаге $k = n + 1$; $c = n + \frac{3}{4}$

$$\begin{aligned} \frac{C_{ijk}^k - C_{ijk}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k + L_z^- C^k) + \\ \frac{\sigma}{4} C_{ijk}^k = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + \\ + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k + M_{zz}^- C^c + M_{zz}^+ C^k); \end{aligned}$$

- на пятом шаге осуществляется расчет изменения концентрации под действием источников.

В данные разностные соотношения входит «возмущенный» коэффициент диффузии $\tilde{\mu}$ [5]. Для нейтрализации NH_3 используется подачи раствора ортофосфорной кислоты. Уравнение кинетики в этом случае имеет вид:



Алгоритм моделирования

Алгоритм моделирования процесса нейтрализации токсичного облака заключается в следующем:

1) задается форма облака, его размеры, концентрация токсиканта в нем (в численной модели имеется возможность задавать любую форму облака – сферу, «гриб» и т. п.);

2) вводится информация о метеоусловиях – скорость, направление ветра значение коэффициентов турбулентной диффузии (в численной модели есть возможность задавать также профиль ветра);

3) задается маршрут движения вертолета, его скорость, режим подачи нейтрализатора;

4) осуществляется моделирование процессов миграции NH_3 , нейтрализатора в атмосфере и расчет количества нейтрализованного аммиака на выбранный момент времени.

Результаты моделирования

Рассматриваются два сценария ликвидации облака токсичного газа. В первом сценарии движется один вертолет (на рис. 2 стрелками обозначен его маршрут), который осуществляет в течение 30 с выброс нейтрализатора с интенсивностью $q = 50$ кг/с. Во втором сценарии через 45 с после начала полета первого вертолета, вдоль его трассы начинает двигаться второй вертолет, который с той же интенсивностью осуществляет подачу нейтрализатора в облако.

Средняя концентрация NH_3 в облаке – $5 \cdot 10^{-5}$ кг/м³; коэффициент турбулентной диффузии – 2,5 м²/с; скорость вертолета – 5 м/с; скорость ветра – 3 м/с, азимут – 55°. Нейтрализатор выбрасывается в течение 20 с с вертолета. Высота облака – 74 м, длина облака – 128 м, ширина – 144 м.

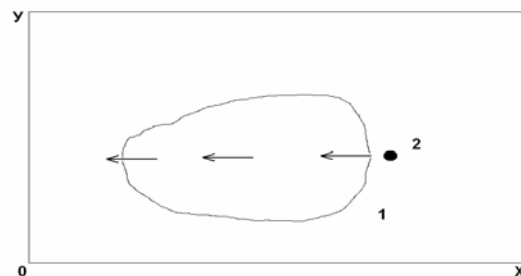


Рис. 2. Схема маршрута движения вертолета:
1 – облако NH_3 ; 2 – вертолет

Скорость оседания капель нейтрализатора – 0,03 м/с. Выброс нейтрализатора осуществляется на высоте 74 м над землей.

Перейдем к рассмотрению результатов моделирования. В табл. 1 и 2 показано какое количество аммиака нейтрализовано в тот или иной момент времени для каждого сценария стратегии ликвидации облака NH_3 . Отметим, что суммарное количество аммиака в облаке, перед началом нейтрализации составляет примерно 83 кг.

Таблица 1

Количество аммиака нейтрализованного при полете одного вертолета

t, c	Количество нейтрализованного аммиака
15	10
30	28
60	48

Таблица 2

Количество аммиака нейтрализованного при полете двух вертолетов

t, c	Количество нейтрализованного аммиака
45	40
60	48
75	54
90	57

Сопоставление данных в табл. 1 и 2 позволяет сделать вывод о степени эффективности выбранной стратегии при выбранном маршруте, интенсивности и режиме подачи нейтрализатора, а также дает возможность определить, какое количество токсичного газа будет далее мигрировать в атмосфере, если процесс нейтрализации будет на этом этапе завершен. Это позволяет прогнозировать уровень дальнейшего загрязнения атмосферы, подстилающей поверхности, оценивать возможный ущерб и последствия после проведенной операции по нейтрализации и принимать решения по организации дальнейших защитных мероприятий.

На рис. 3–7 показана динамика изменения формы токсичного облака при его обработке нейтрализующим раствором. Хорошо видно, что для приводимых моментов времени часть облака, прилегающая к подстилающей поверхности еще «не успела» попасть под действие нейтрализатора. Данные рисунки иллюстрируют возможность разработанного пакета программ «наблюдать» как происходит процесс нейтрализации в разных местах облака и выявлять подзоны, их размеры, интенсивность, где процесс нейтрализации еще не произошел.

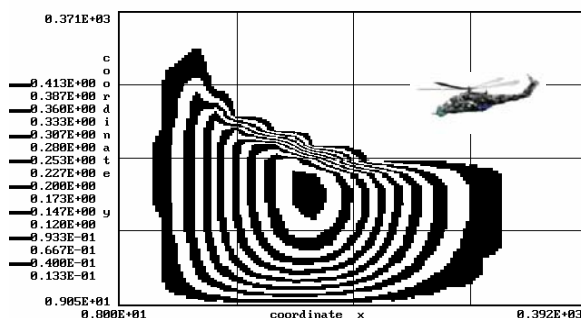


Рис. 3. Форма облака NH_3 через 30 с после начала нейтрализации (один вертолет, распределение концентрации по высоте, сечение $y = 60$ м)

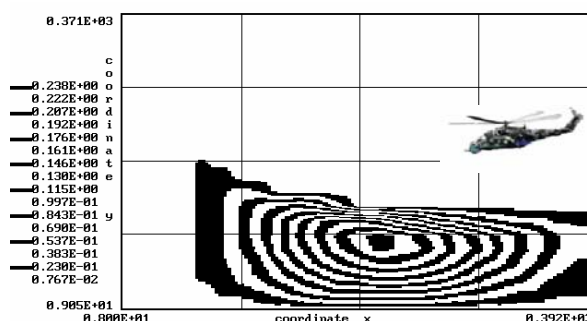


Рис. 4. Форма облака NH_3 через 60 с после начала нейтрализации (один вертолет, распределение концентрации по высоте, сечение $y = 60$ м)

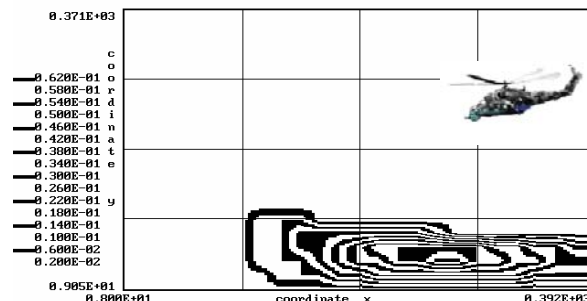


Рис. 5. Форма облака NH_3 через 90 с после начала нейтрализации (один вертолет, распределение концентрации по высоте, сечение $y = 60$ м)

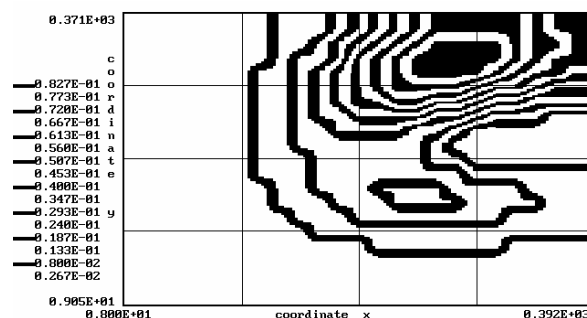


Рис. 6. Распределение NH_3 на уровне $z = 16$ м от земли (два вертолета, $t = 90$ с)

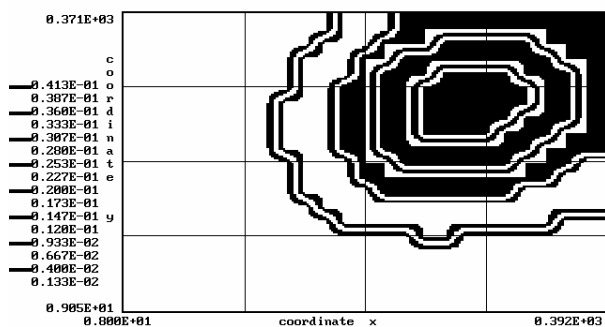


Рис. 7. Распределение NH_3 на уровне $z = 2,4$ м от земли (два вертолета, $t = 90$ с)

Выводы

В работе разработана трехмерная численная модель миграции примесей в атмосфере и на ее основе создан метод расчета нейтрализации мигрирующего в атмосфере облака токсичного газа. Нейтрализация осуществляется за счет подачи нейтрализующего раствора от летающего аппарата (вертолета). Разработанный метод расчета позволяет учитывать профиль ветра, геометрическую форму облака, различные сценарии движения вертолета и выброса нейтрализатора. Дальнейшее совершенствование модели и метода расчета следует вести в направлении разработки и адаптации их на процесс миграции тяжелого газа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: Учебное пособие в 5 т. / Под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаева. – М.: Изд-во АСВ, 2001. – 164 с.
2. Беляев Н. Н. Прогнозирование качества воздушной среды методом вычислительного эксперимента / Н. Н. Беляев, Е. Д. Коренюк, В. К. Хрущ. – Д.: Наука и образование, 2000. – 208 с.
3. Иванов Ю. А. Хранение и транспортировка жидкого аммиака / Ю. А. Иванов, И. И. Стижневский. – М.: Химия, 1991. – 80 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. Плахотник В. Н. Природоохранная деятельность на железнодорожном транспорте Украины: проблемы и решения / В. Н. Плахотник, Л. А. Ярышкина, В. И. Сираков и др. – К.: Транспорт Украины, 2001. – 244 с.
6. Купаев В. И., Рассказов С. В. Методы локализации очага аварий и ликвидации ее последствий на химически опасных объектах железнодорожного транспорта // Транспорт: Наука, техника, управление. – 2003. – № 4. – С. 28–34.

Поступила в редколлегию 21.11.2005.