

ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ВОСХОДЯЩИХ СТРУЙ

Розроблено тривимірну математичну модель захисту атмосфери від забруднення під час міграції хмари токсичної речовини за рахунок створення вертикальної повітряної струї. Модель заснована на чисельному інтегруванні рівняння переносу домішки та моделі течії невязкої рідини. Наведено результати обчислювального експерименту.

Разработана трехмерная математическая модель защиты атмосферы от загрязнения при миграции облака токсичного вещества за счет создания вертикальной воздушной струи. Модель основана на численном интегрировании уравнения переноса примеси и модели течения невязкой жидкости. Приведены результаты вычислительного эксперимента.

A 3-D computer model has been developed to simulate the atmosphere protection from pollution with the use of vertical air jet in case of movement of a toxic cloud. The model is based on the gradient transport model and potential flow model numerical integration. Results of numerical experiments are presented.

Одним из методов защиты атмосферы от загрязнения при переносе в ней токсичных веществ является организация восходящих воздушных струй на пути миграции токсиканта (рис. 1).

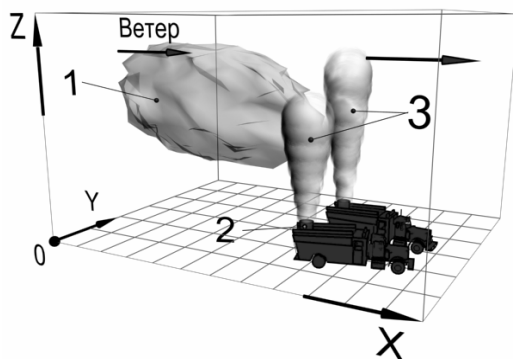


Рис. 1. Схема создания восходящей струи воздуха от вентилятора:

1 – облако токсичного газа; 2 – вентиляторная установка; 3 – восходящая струя воздуха

Струи создают «препятствие» на пути мигрирующего токсиканта и тем самым позволяют снизить уровень загрязнения воздушной среды возле защищаемого экологически важного объекта. На практике для создания восходящих струй может использоваться также очаг горения [8].

Задача о взаимодействии струи со встречным потоком рассматривалась во многих научных публикациях. Для решения этой задачи применялись экспериментальные, аналитические и методы численного моделирования, с применением моделей турбулентности различного уровня [1; 3–6]. Однако анализ литературных источников показал, что применительно к проблеме защиты атмосферы от загрязнения

при миграции токсичного облака, отсутствует решение данной задачи, которое можно было бы положить в основу расчета и поддержки принятия обоснованных технических решений.

Целью данной работы является создание численной модели и экспресс метода, позволяющего оценить эффективность применения данного метода защиты атмосферы, с учетом основных факторов, влияющих на данный процесс.

Математическая модель. В качестве исходной, базовой модели для описания миграции облака токсичного вещества в атмосфере используется уравнение конвективно-диффузионного переноса примеси [9]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (\omega - \omega_s)C}{\partial z} + \sigma C = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где C – концентрация загрязняющего вещества; u, v, ω – компоненты вектора скорости воздушной среды в декартовой системе координат; σ – коэффициент, учитывающий процессы химического разложения загрязнения; μ_x, μ_y, μ_z – коэффициенты турбулентной диффузии; t – время, ω_s – скорость гравитационного осаждения загрязняющего вещества.

Если рассматривается задача о загрязнении атмосферы при испарении или ином характере аварийного выброса токсичного вещества в атмосферу, то в правую часть уравнения (1) добавляется слагаемое вида

$$\sum q_i(t)\delta(r-r_i),$$

где q_i – интенсивность выброса загрязняющего вещества; $r_i = (x_i, y_i, z_i)$ – координаты источника выброса; $\delta(r-r_i)$ – дельта-функция Дирака.

Постановка краевых условий для уравнения (1) рассмотрена в работах [7; 9].

Вертикальную воздушную струю будем моделировать «вдувом» (рис. 2). Зона вдува располагается на плоскости $Z=0$.

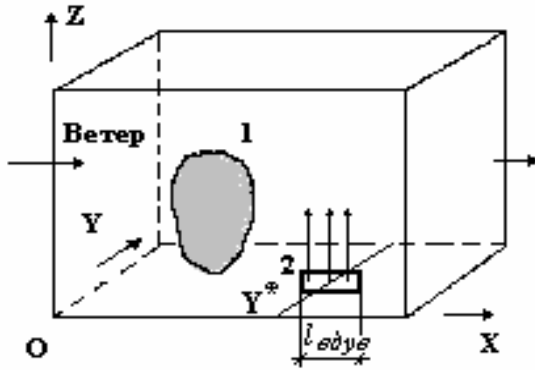


Рис. 2. Схематизация расчетной области: 1 – облако токсичного газа; 2 – зона вдува

Будем считать, что компоненты скорости воздушной среды определяются соотношениями:

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

где P – потенциал скорости.

Тогда в силу уравнения неразрывности, уравнение для определения потенциала имеет вид:

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

Для численного интегрирования уравнений модели применяется прямоугольная разностная сетка. Значения потенциала определяются в центре разностных ячеек, а значение компонента вектора скорости – на гранях разностных ячеек.

Для уравнения (2) ставятся следующие граничные условия:

- на выходящей границе (см. рис. 2) задается значение потенциала; боковые, верхняя и нижняя границы считаются твердыми непроницаемыми стенками и на них ставится условие

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

где n – единичный вектор внешней нормали к границе;

- на границах, где в расчетную область входит воздушный поток, ставится условие Неймана

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

где V – скорость втекания.

Метод решения. Численное интегрирование уравнения (1) осуществляется на прямоугольной разностной сетке. Рассмотрим неявную разностную схему расщепления [7], которая положена в основу разработанного алгоритма расчета.

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

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

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

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

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

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

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

где

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}; \quad u^- = \frac{u - |u|}{2};$$

$$v^+ = \frac{v + |v|}{2}; \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}$$

и т. д.

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

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

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:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + \\ & + L_y^- C^{n+1} + L_z^+ C^{n+1} + L_z^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = \\ & = \left(M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} + \right. \\ & \left. + M_{yy}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1} + M_{zz}^- C^{n+1} \right). \end{aligned}$$

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

- на первом шаге $k = \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k + L_z^+ C^k \right) + \frac{\sigma}{4} C_{ijk}^k = \\ & = \frac{1}{4} \left(M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^k + \right. \\ & \left. + M_{yy}^- C^k + M_{zz}^+ C^k + M_{zz}^- C^k \right); \quad (3) \end{aligned}$$

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

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

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

используется формула (4);

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

используется формула (3).

Отметим, что преимуществом данной схемы расщепления является то, что на каждом дробном шаге неизвестное значение концентрации загрязняющего вещества определяется по методу бегущего счета. Разностная схема является абсолютно устойчивой на каждом дробном шаге и легко программируется.

Численное интегрирование уравнения для потенциала скорости осуществляется с использованием метода Либмана.

На основе рассмотренных разностных уравнений разработан специализированный пакет прикладных программ.

Алгоритм решения. Алгоритм решения задачи заключается в следующем:

1. Вводится информация о размерах расчетной области, скорости, профиле ветра, параметрах диффузии, форме, размерах облака, мигрирующего в атмосфере, и концентрации токсиканта в нем (или задается место выброса, интенсивность выброса загрязнителя при аварии, например, в случае испарения токсичного вещества от зоны разлива).

2. Задается местоположение технических средств, осуществляющих подачу воздушных струй.

3. Выполняется расчет уравнения для потенциала и определяется значение поля потенциала в расчетной области.

4. Рассчитывается результирующее поле скорости воздушного потока.

5. Рассчитывается уравнение миграции токсиканта в атмосфере.

Практическая реализация. Рассмотрим применение разработанной трехмерной численной модели и созданного на ее основе метода расчета, для решения ряда прикладных задач по защите атмосферы от загрязнения, путем создания вертикальной восходящей струи на пути миграции токсичного вещества.

Задача 1. Рассмотрим процесс защиты атмосферы от загрязнения при миграции облака токсичного вещества. На пути облака создается фронт (этот фронт может быть организован, например, горением) вертикальных воздушных струй. При этом рассматриваются такие варианты защиты:

1 вариант. Организуется подача вертикальных восходящих потоков воздуха поперек направления движения ветрового потока (см. рис. 1), причем ширина зоны «вдува» (вдоль направления ветра) – $l_{\text{вдув}} = 10$ м (см. рис. 2); длина зоны «вдува» (поперек направления ветра) – $l = 70$ м; скорость «вдува» – 5 м/с; скорость ветра – 2 м/с;

2 вариант. Ширина зоны «вдува» – $l_{\text{вдув}} = 20$ м, длина зоны «вдув» – $l = 70$ м; скорость «вдува» – 5 м/с; скорость ветра – 2 м/с.

Остальные параметры расчета таковы: ветер направлен вдоль оси OX ; коэффициент турбулентной диффузии – $0,1 \text{ м}^2/\text{с}$; концентрация токсичного вещества в облаке примеси равна $C = 1$ (в безразмерном виде); размеры облака: $30 \times 30 \times 40$ м; размеры расчетной области $120 \times 120 \times 120$ м. В начальный момент времени $t = 1$ с. облако расположено на расстоянии $\Delta x = 10$ м от места «вдува», симметрично сечению $y = 60$ м.

Результаты решения данной задачи представлены ниже. В табл. 1 показана интенсивность загрязнения атмосферы по высоте (момент времени $t = 25$ с) в сечении $y = 60$ м для каждого варианта задачи на расстоянии $x = 30$ м от места «вдува».

Таблица 1

**Распределение концентрации
токсичного вещества (в безразмерном виде)
по высоте (момент времени $t = 25$ с)**

Высота Z , м	5	15	25
Вариант 1	0,051	0,184	0,341
Вариант 2	0,000	0,066	0,198

Из табл. 1 хорошо видно, что увеличение ширины зоны «вдува» позволило существенно уменьшить уровень загрязнения атмосферы в расчетном сечении. На рис. 3 показана зона загрязнения атмосферы для первого варианта задачи. Отчетливо видна «степень отжатия» загрязненной части воздуха от поверхности земли для моделируемого сценария, т. е. образование за вертикальной струей зоны с пониженным значением концентрации примеси.

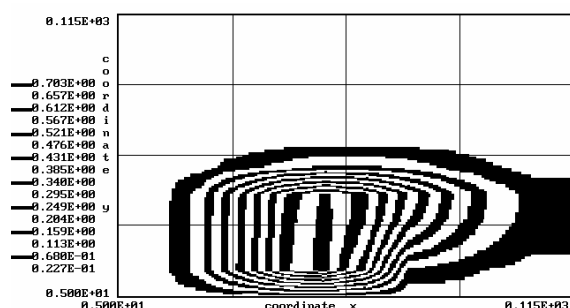


Рис. 3. Зона загрязнения атмосферы, $t = 25$ с
(сечение $y = 60$ м)

Задача 2. В данной задаче, в отличие от предыдущей, рассматривается миграция не облака в атмосфере, а миграция шлейфа токсичного вещества, образующегося от испарения над зоной аварийного разлива (рис. 4). На пути миграции шлейфа устанавливается вентилятор-

ная установка, создающая вертикальную восходящую струю воздуха.

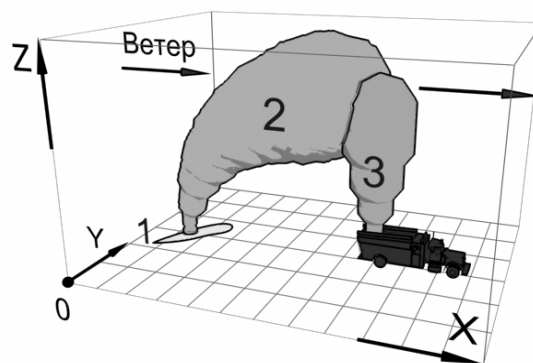


Рис. 4. Расчетная схема

Параметры задачи: зона разлива имеет форму квадрата со стороной 5 м (сечение $y = 60$ м); интенсивность испарения токсичного вещества (аммиака) от зоны составляет 220 г/с; скорость ветра 7 м/с, ветер направлен вдоль оси OX ; зона «вдува» a располагается на расстоянии 30 м от места аварийного разлива (сечение $y = 60$ м); коэффициент турбулентной диффузии $\mu = 0,1$ м²/с; размеры расчетной области $60 \times 60 \times 60$ м; зона «вдува» имеет форму квадрата со стороной 5 м рассматриваются два варианта задачи – скорость «вдува» 25 и 45 м/с.

Результаты вычислительного эксперимента представлены ниже. В табл. 2 показана интенсивность загрязнения атмосферы по высоте ($x = 30$ м) для каждого варианта задачи, а в табл. 3 – уровень загрязнения атмосферы на высоте 5 м от поверхности земли в сечении $x = 70$ м, поперек направления ветра. Здесь отметим, что значению $y^* = 0$ соответствует местоположение вентиляторной установки.

Таблица 2

Распределение концентрации токсичного вещества по высоте ($t = 22$ с, сечение $y = 60$ м)

Высота Z , м	5	15	25
Вариант 1. Скорость «вдува» 25 м/с, г/м ³	0,087	0,175	0,074
Вариант 2. Скорость «вдува» 45 м/с, г/м ³	0,000	0,0187	0,078

Таблица 3

**Распределение концентрации токсичного вещества поперек направления ветра
($t = 25$ с, сечение $x = 70$, $Z = 5$ м)**

Координата y^* , м	-15	-10	-5	0	5	10	15
Вариант 1. Скорость «вдува» 25 м/с, г/м ³	0,012	0,062	0,161	0,086	0,161	0,062	0,012
Вариант 2. Скорость «вдува» 45 м/с, г/м ³	0,025	0,075	0,087	0	0,087	0,075	0,025

Таким образом, «отрицательное» значение y^* означает положение расчетной точки «влево» от вентиляторной установки, а положительное значение y^* соответственно «вправо» от нее. Максимальное значение концентрации токсичного вещества для этого момента времени составляет $-1,25 \text{ г/м}^3$.

Анализ данных из табл. 2 и 3 позволяет отметить, что увеличение скорости «вдува» 25...45 м/с позволяет существенно снизить уровень загрязнения атмосферы лишь локально, вблизи места расположения установки. Видно, что при скорости «вдува» $v = 25 \text{ м/с}$ воздух остается загрязненным непосредственно вблизи установки.

Форма и интенсивность зоны загрязнения атмосферы вблизи расположения вентиляционной установки показана на рис. 5, 6.

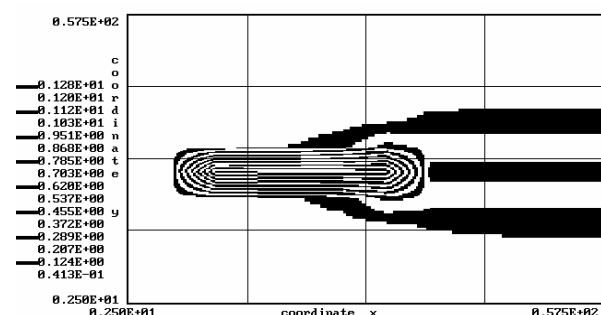


Рис. 5. Зона загрязнения атмосферы, $t = 25 \text{ с}$ (сечение $Z = 5 \text{ м}$, скорость «вдува» – 25 м/с)

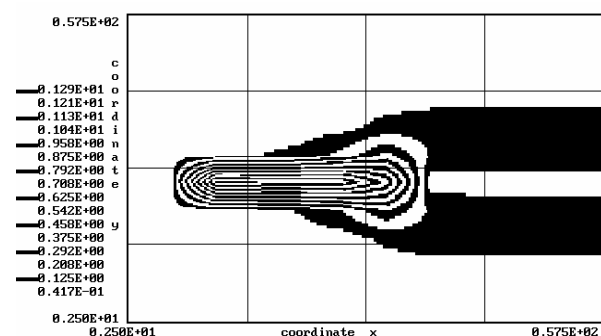


Рис. 6. Зона загрязнения атмосферы, $t = 25 \text{ с}$ (сечение $Z = 5 \text{ м}$, скорость «вдува» – 45 м/с)

На основе проведенного вычислительного эксперимента можно утверждать, что необходимо обязательное использование средств защиты органов дыхания персоналом, обслуживающим вентиляционную установку. Например, если учитывать, что для аммиака $ПДК = 20 \text{ мг/м}^3$, то, очевидно, что для рассмотренного случая концентрация токсичного вещества даже вблизи установки будет значительно превосходить эту величину.

Выводы

Разработана трехмерная численная модель процесса защиты атмосферы от загрязнения при миграции облака токсичного вещества за счет создания вертикальной воздушной струи на пути облака.

На базе построенной численной модели разработан метод расчета данного процесса. Расчет одного варианта задачи требует около 10 с машинного времени, что позволяет оперативно выполнить прогноз эффективности выбранной схемы расположения технических средств, создающих вертикальную воздушную струю, по отношению к мигрирующему облаку, а также метеоусловий. Дальнейшее развитие данного подхода следует осуществлять в направлении создания математической модели учитывающей вязкостные эффекты и наличие препятствий на пути миграции облака.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамович Г. Н., Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович, Т. А. Гиршович, С. Ю. Крашенинников и др.; Под ред. Г. Н. Абрамовича. – М.: Наука, 1984. – 715 с.
2. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: Учебное пособие. В 5-ти кн. / Под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаява. – М.: Изд-во АСВ, 2001. – 200 с.
3. Адлер Д. Расчет трехмерного течения круглой струи в поперечном потоке т. 17 / Д. Адлер, А. Барон // Расчет техники и космонавтики. – 1979. – № 2. – С. 53–60.
4. Богомолов Е. Н. Искривление плоской струи в ограниченном сносящем потоке при наличии застойной зоны // Изв. вузов. авиац. техника – 1978. – № 1.
5. Бруацкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов. – К.: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
6. Гиршович Т. А. Турбулентные струи в поперечном потоке. – М.: Машиностроение, 1993. – 256 с.
7. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К.: Наук. думка – 1997. – 368 с.
8. Купаев В. И. Методы локализации очага аварий и ликвидации ее последствий на химически опасных объектах железнодорожного транспорта / В. И. Купаев, С. В. Рассказов // Транспорт. наука, техника, управление. – 2003. – № 4. – С. 28–34.
9. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука. – 1982. – 320 с.
10. Салтанов Н. В. Вихревые структуры в жидкости: аналитические и численные решения / Н. В. Салтанов, В. А. Горбань. – К.: Наук. думка, 1993. – 244 с.

Поступила в редколлегию 17.02.2006.