

УДК 519.6:504.3.054

© Н.Н. Беляев, А.В. Берлов

## **РАСЧЕТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ДИВЕРСИИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ В СЛУЧАЕ ПЕРЕВОЗКИ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНОГО ГРУЗА**

Представлена численная модель, позволяющая оперативно рассчитать динамику загрязнения атмосферного воздуха на примагистральной территории при диверсии в случае транспортировки железнодорожным транспортом химически опасного груза. Для расчета рассеивания опасного вещества в атмосферном воздухе применено двухмерное уравнение переноса примеси, аэродинамика воздушных потоков рассчитывается на базе уравнений Навье-Стокса.

Представлена чисельна модель, що дозволяє оперативно розрахувати динаміку забруднення атмосферного повітря на примагістральній території при диверсії у випадку транспортування залізничним транспортом хімічно небезпечного вантажу. Для розрахунку розсіювання небезпечної речовини в атмосферному повітрі застосоване двомірне рівняння переносу домішки, аеродинаміка повітряних потоків розраховується на базі рівнянь Нав'є-Стокса.

A numerical model allowing operatively to compute the dynamics of air pollution on the territory near railway at terroract in the case of transport by rail chemically hazardous cargo. To compute the dispersion of hazardous substances in the ambient air is applied two-dimensional equation of pollutant transport, the aerodynamics of air flow is computed based on the Navier-Stokes equations.

**Вступление.** К числу наиболее опасных источников возможного химического загрязнения окружающей среды при перевозке железнодорожным транспортом относится ракетное топливо, и в частности, твердое ракетное топливо (ТРТ) ракетной системы РС-22 (рис.1.), которое складировано на Павлоградском химическом заводе.



Рис. 1. Перевозка снаряженных корпусов твердотопливных ракетных двигателей РС-22 железнодорожным транспортом

Перевозка таких грузов определяет весьма высокий потенциальный уровень рисков возникновения чрезвычайных транспортных происшествий (аварий, диверсий) последствия которых может быть катастрофичным. Известно, что к перевозке таких опасных грузов предъявляются очень строгие требования, но, не смотря на это, возможно возникновение аварии или диверсии при транспортировке. В связи с этим представляется актуальным расчет возможного загрязнения атмосферы при диверсии на железнодорожном транспорте при перевозке ТРТ (рис.2). В этом случае особо важно оценить риск токсичного поражения людей на примагистральной территории, где нередко располагаются здания.

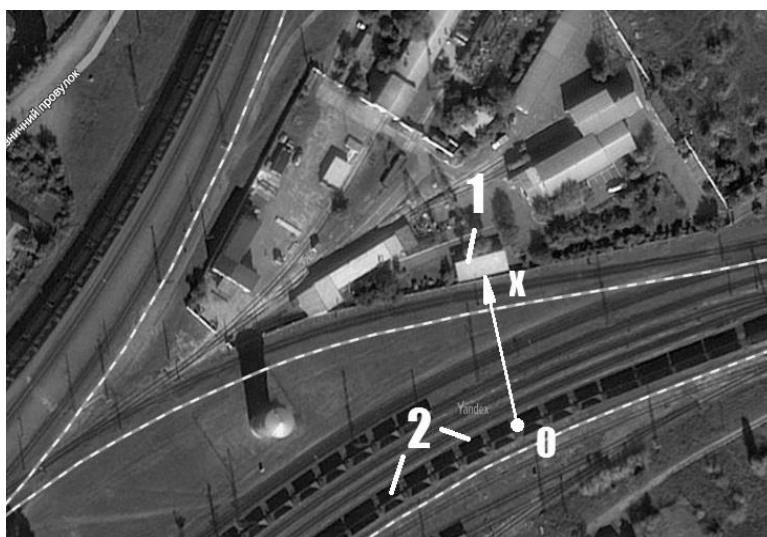


Рис. 2. Общий вид расчетной зоны: 1 – здание на территории станции «Павлоград-1», 2 – железнодорожный состав

**Анализ существующих решений.** В настоящее время в Украине для оценки последствий аварийных выбросов на химически опасных объектах и транспорте применяется нормативная методика или методика ОНД-86, РД 52.04.253-90 [3]. Данные методики не учитывают скорость ветра, атмосферную диффузию на процесс формирования зоны загрязнения. Для решения задач данного класса также применяются различные аналитические модели и модель Гаусса [2]. Данные модели позволяют оперативно рассчитать зону загрязнения, но для упрощенных ситуаций типа точечный постоянно действующий источник выброса или точечный мгновенный выброс [2]. Для применения модели Гаусса необходимо научное обоснование значений коэффициентов дисперсии для территории Украины, которое в настоящее время отсутствует. Сейчас осуществляется активная разработка CFD моделей для решения задач прогноза аварийного загрязнения атмосферы. Это связано с тем, что модели данного класса позволяют максимально учитывать те физические факторы, которые оказывают влияющее значение на формирование зон загрязнения [1, 2, 4, 5].

**Целью** данной работы является разработка CFD (Computational Fluid Dynamics) модели для прогноза загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива в железнодорожном вагоне, расположенном вблизи здания

на примагистральной территории (вокзал, диспетчерский пункт и т.д.). Основное требование к данной модели – учет основных физических факторов при моделировании и малые затраты компьютерного времени при практической реализации модели.

**Математическая модель.** При расчете процесса загрязнения атмосферы, в масштабе «microscale» (расстояние порядка 50 – 100м) в случае аварийной ситуации – возгорание в железнодорожном вагоне ТРТ, решение задачи разбивается на два шага. На первом шаге решается задача по определению поля скорости воздушного потока с учетом взаимодействия выходящего из железнодорожного вагона газового потока с ветровым потоком. Для решения этой задачи применяются уравнения Навье-Стокса, записанные в переменных Гельмгольда:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = \nu \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \quad (2)$$

где  $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$  – завихренность;  $\psi$  – функция тока;  $\nu$  – коэффициент турбулентной вязкости. Ось Y направлена вертикально вверх.

Компоненты вектора скорости воздушного потока рассчитываются по зависимостям

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}.$$

Постановка краевых условий для данной системы уравнений приведена в [1].

После определения поля скорости воздушного потока решается задача о переносе загрязняющих веществ (продуктов горения твердого ракетного топлива) в атмосфере. Для моделирования этого процесса используется уравнение переноса примеси в атмосфере [1, 4, 5]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u C}{\partial x} + \frac{\partial v C}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (3)$$

где  $C$  – концентрация загрязняющего вещества;  $u, v$  – компоненты вектора скорости воздушного потока;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии;  $Q$  – интенсивность выброса загрязнителя;  $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$  – дельта-функция Дирака;  $x_i, y_i$  – координаты источника выброса;  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий химический распад загрязнителя;  $t$  – время.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [1].

В разработанной численной модели используются следующие зависимости для задания профиля ветра и вертикального коэффициента атмосферной диффузии [2]:

$$u = u_1 \left( \frac{y}{y_1} \right)^p, \quad \mu_y = k_1 \left( \frac{y}{y_1} \right)^m, \quad \mu_x = k_0 u,$$

где  $u_1$  – скорость ветра на высоте  $y_1$  (принимается  $z_1=10$ м);  $k_1=0,2$ ;  $k_0=0,1$ ;  $p=0,16$ ;  $m \approx 1$ .

Численное интегрирование уравнений модели выполняется на прямоугольной разностной сетке. При формировании расчетной области используется метод маркирования [1]. С помощью маркеров задается, положение железнодорожного вагона, форма и местоположение здания вблизи места эмиссии загрязнителя.

**Метод решения.** Численное интегрирование уравнений Навье – Стокса осуществляется с помощью неявных разностных схем [1]. Для численного интегрирования уравнения переноса примеси используется попеременно-треугольная неявная разностная схема расщепления [1, 4, 5].

**Практическая реализация модели.** Разработанная численная модель относится к классу «diagnostic models». Данные модели учитывают основные физические факторы, влияющие на развитие чрезвычайной ситуации, но при этом требуют небольших затрат компьютерного времени при практической реализации на компьютерах малой и средней мощности (время расчета порядка нескольких минут). Эти модели используются для быстрого серийного расчета разнообразных сценариев чрезвычайных ситуаций и диагностики интенсивности загрязнения окружающей среды. «Diagnostic models» обеспечивают быстрый расчет зон загрязнения и социального риска для моделируемой чрезвычайной ситуации.

Разработанная численная модель реализована в виде прикладных программ (кодов) для проведения вычислительного эксперимента на персональном компьютере.

На базе рассмотренной CFD модели был создан пакет прикладных программ «WALL-2». Для программирования использовался FORTRAN.

Пакет программ включает в себя следующие подпрограммы:

1. TB2 – численный расчет рассеивания опасного вещества в атмосфере на первом шаге расщепления;
2. TB3 – численный расчет рассеивания опасного вещества в атмосфере на втором шаге расщепления;
3. TB4 – численный расчет рассеивания опасного вещества в атмосфере на третьем шаге расщепления;
4. TB5 – численный расчет рассеивания опасного вещества в атмосфере на четвертом шаге расщепления;
5. TB6 – реализация граничных условий;
6. ZNS – решение уравнения переноса завихренности;
7. GFNS – реализация граничных условий для уравнения переноса завихренности;
8. ZNSPS – решение уравнения для функций тока;
9. ZKL – реализация граничных условий для уравнения для функции тока;

10. TB1.dat – файл ввода данных, необходимых для проведения вычислительного эксперимента.

Основные этапы алгоритма решения задачи с помощью данного пакета программ показаны на рис. 3.

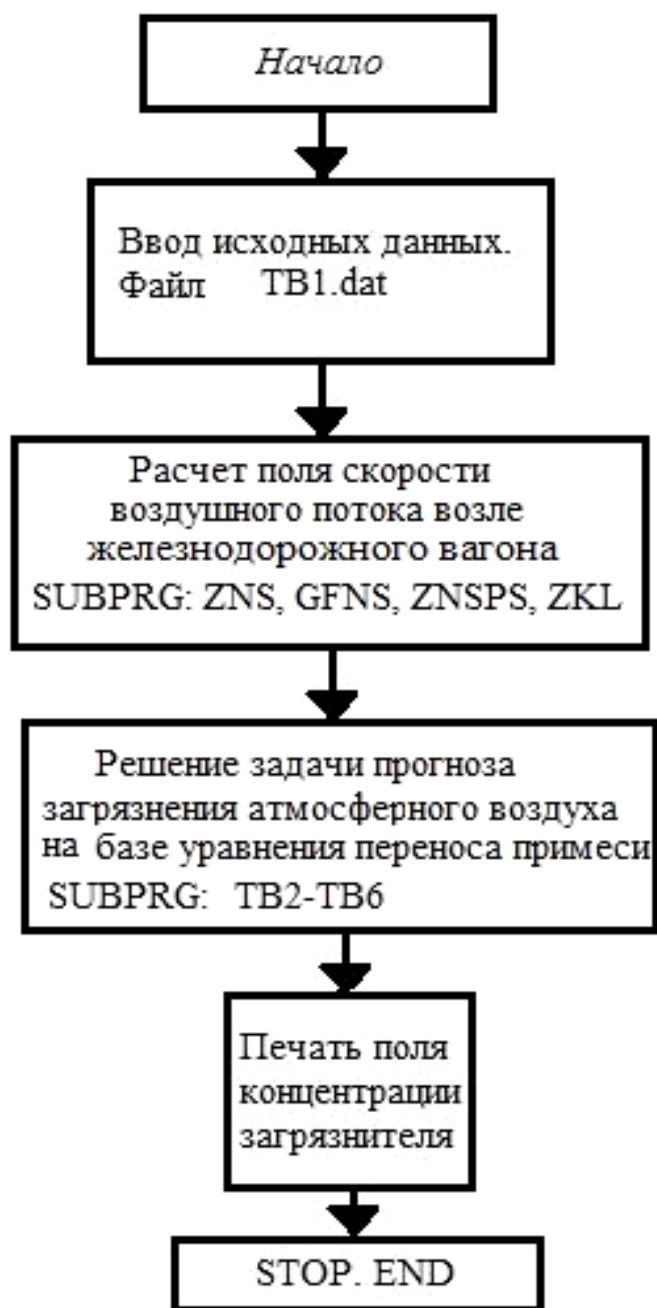


Рис. 3. Основные этапы алгоритма решения задачи с помощью пакета программ «WALL-2»

Разработанная модель ориентирована на решение следующей задачи. Рассматривается железнодорожный вагон, в котором транспортируется твердое ракетное топливо РС-22. Ставится задача по оценке уровня загрязнения приземного слоя атмосферы при чрезвычайной ситуации в железнодорожном вагоне, когда произойдет возгорание топлива внутри вагона и струя газа – про-

дуктов горения будет выходить из вагона наружу, приводя к загрязнению воздушной среды на примагистральной территории. Рассматривается расчет загрязнения воздушной среды вблизи здания на станции «Павлоград-1» (рис.2).

Расчет выполнялся при следующих исходных данных: значение скорости ветра на фиксированной высоте  $Y_1$  равна 8м/с. Размеры расчетной области 75м\*26м; высота здания –12 м;  $\sigma = 0$ .

Внутри железнодорожного вагона задается разностная ячейка, из которой выходит поток со скоростью  $V_{gas}$ , содержащий загрязнитель ( $HCl$ ) с концентрацией 100 ед. (в безразмерном виде).

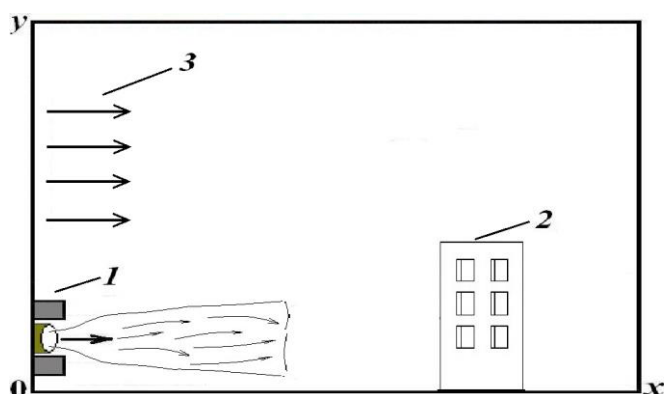


Рис. 4. Схема расчетной области: 1 – железнодорожный вагон; 2 – здание; 3 – направление ветра

Скорость струи выходящего из вагона газового потока – продуктов сгорания принята равной  $V_{gas} = 20 \text{ м/с}$  (рис.4).

**Результаты параметрических исследований.** Рассмотрим результаты моделирования, полученные на базе разработанной численной модели. На рис. 5 показана зона загрязнения возле вагона и здания при возникновении аварийной ситуации.

Как видно из рис. 5 возле вагона формируется подзона загрязнения, характеризующаяся большим градиентом концентрации примеси. Хорошо видно как струя продуктов горения распространяется вдоль земной поверхности (нижняя граница струи), а верхняя граница струи огибает здание, находящееся возле железнодорожного полотна. Из рис. 5 также видно, что перед зданием и за зданием формируется интенсивная зона загрязнения. Это значит, что в окна здания будет поступать воздух содержащий продукты горения. Кроме этого создастся угроза для людей, покидающих здание через двери расположенные на подветренной стороне, поскольку, как видно из рис. 5, здесь образовалась зона загрязнения. Таким образом, при возникновении рассматриваемой чрезвычайной ситуации возникает угроза токсичного поражения людей на примагистральной территории.

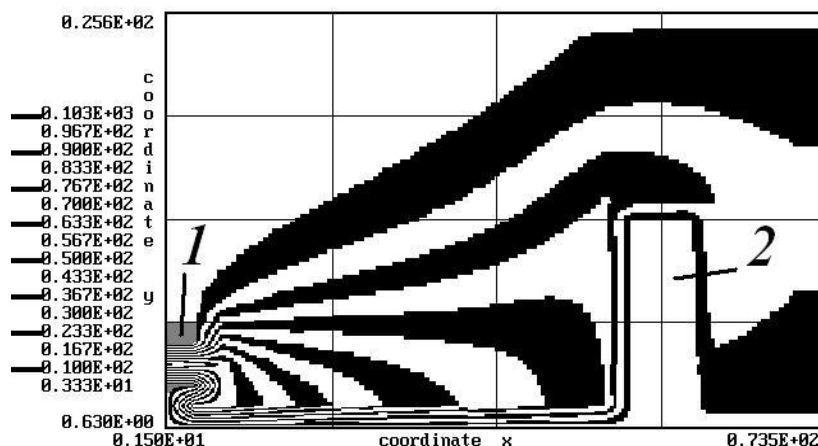


Рис. 5. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени  $t=20$  сек.: 1 – железнодорожный вагон, 2 – здание

**Выводы.** Рассмотрена эффективная численная модель «diagnostic model» для экспресс расчета уровня загрязнения атмосферы при аварийной ситуации при перевозке железнодорожным транспортом твердого ракетного топлива. Предложенная модель позволяет рассчитать гидродинамику ветрового потока с учетом его взаимодействия с газовым потоком – продуктом горения ракетного топлива. Разработанная модель была использована для локального прогноза загрязнения атмосферного воздуха при чрезвычайной ситуации на железной дороге при горении ТРТ.

Дальнейшее совершенствование модели следует проводить в направлении ее развития для расчета 3D переноса примеси в атмосфере.

#### Список литературы

1. Беляев Н. Н. Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы: монография / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машихина. – Д.: «Акцент ПП», 2014. – 127 с.
2. Бруцкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруцкий. – К.: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
3. Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. – К., 2001. – 33 с.
4. Belyaev M. Air Pollution Modelling of Technogenic Catastrophes caused by Terrorist Attacks on Rail Transport of Chemical Substances / M. Belyaev // Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment. NATO Science for Peace and Security Series. – С.: Environmental Security, Springer, 2007. – P. 327 – 336.
5. Biliaiev M. M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // Conference Abstracts of 31st NATO / SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application. – Torino, Italy, 2010. – № P1.7.

Рекомендовано до публікації д.т.н. Голінком В.І.  
Надійшла до редакції 25.09.2014