

УДК 519.6

Н. Н. Беляев*, А. В. Берлов**

**Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
им. академика В. Лазаряна*

***Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ГОРЕНИИ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

Розроблено метод розрахунку аварійного забруднення атмосфери при горінні твердого ракетного палива. Метод базується на чисельному інтегруванні тривимірного рівняння міграції домішки у повітрі. Наводяться результати чисельного експерименту.

Ключові слова: тверде ракетне паливо, аварійна ситуація, забруднення атмосфери.

Разработан метод расчета аварийного загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива. Метод базируется на численном интегрировании трехмерного уравнения миграции примеси в воздухе. Приводятся результаты численного эксперимента.

Ключевые слова: твердое ракетное топливо, аварийная ситуация, загрязнение атмосферы.

The method of calculation emergency contamination of atmosphere is worked out at burning of hard rocket fuel. A method is based on numeral integration of three-dimensional equalization of migration of admixture midair. Results over of numeral experiment are brought.

Key words: hard rocket fuel, emergency situation, contamination of atmosphere.

Актуальность. Как известно одной из экологических проблем Днепропетровской области является наличие складов с твердым ракетным топливом (ТРТ) (рис.1). ТРТ было снято с ракетной системы РС- 22 и отправлено на Павлоградский химический завод (ПХЗ). Это топливо складировано в специальных хранилищах (рис. 2).

В случае чрезвычайной ситуации на этих складах возможно возгорание топлива и интенсивное поступление токсичных продуктов сгорания топлив в атмосферу. Поэтому возникает важная задача прогноза уровня загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации в хранилище.

Решение этого вопроса крайне важно при разработке официального документа ПЛАС (план ликвидации аварийной ситуации).

Целью данной работы является разработка численной модели для оперативного прогноза уровня загрязнения атмосферы при горении ТРТ.

Как известно существующая нормативная методика не позволяет получить решение данной задачи. Эта методика разработана для прогноза зон поражения принципиально для других видов аварий (например, разлив на грунт или в поддон загрязнителя и т.п.).

Применение моделей типа Гаусса не позволяет учесть профиль скорости ветра и неравномерность коэффициентов атмосферной диффузии. Поэтому крайне важно разработка численных моделей для оперативного решения прогнозных задач.

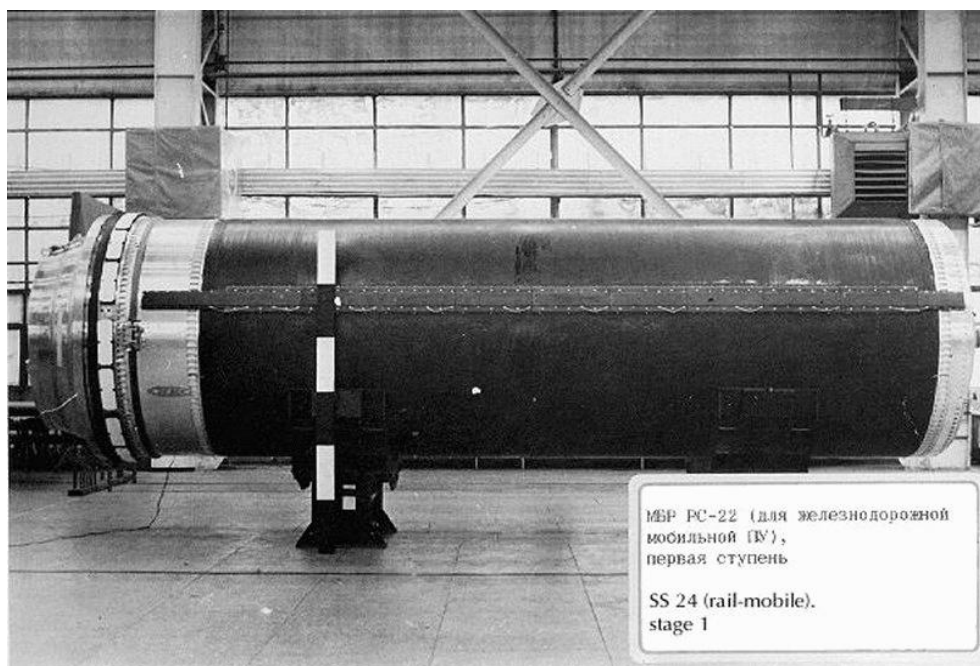


Рис.1. Вид первой ступени ракеты РС-22



Рис. 2. Ангарты для хранения ТРТ

Математическая модель. Для расчета рассеивания концентрации того или иного вещества, образующегося при горении твердого ракетного топлива будем использовать уравнение переноса примеси.

Поскольку при горении твердого топлива происходит выброс нагретых продуктов сгорания, то введем в расчеты эффективную высоту поднятия струи продуктов сгорания, которую рассчитаем на основе формулы

$$\Delta h = -0,029 \frac{V_s \cdot \ell}{u} + 2,62 \frac{(Q_h)^{1/2}}{u}, \quad (1)$$

$$Q_h = \dot{m} \cdot c_p (T_s - T_a), \quad (2)$$

где u – скорость ветра; \dot{m} – массовая скорость потока струи продуктов сгорания в килограммах в секунду; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении газа струи продуктов сгорания; ℓ – характерный размер здания; T_s – температура продуктов сгорания на высоте в кельвинах; T_a – температура атмосферного воздуха на высоте в кельвинах.

Для моделирования процесса переноса загрязняющего вещества в атмосфере используется трехмерное уравнение миграции примеси [4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_z \frac{\partial C}{\partial z}) + \sum Q_i(t) \delta(r - r_i) \end{aligned}, \quad (3)$$

где C – концентрация загрязняющего вещества; u, v, w – компоненты вектора скорости воздушной среды; $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коэффициент турбулентной диффузии; Q – интенсивность выброса токсичного вещества; $\delta(r - r_i)$ – дельта-функция Дирака; $r_i = (x_i, y_i, z_i)$ – координаты источника выброса.

Метод решения. Для численного интегрирования уравнения переноса использовалась неявная разностная схема, рассмотренная в работе [3].

Выполним следующую аппроксимацию производных, входящих в уравнение (3) [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &\approx \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^n}{\Delta t}; \\ \frac{\partial uC}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}; \quad \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}; \quad \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z}; \\ \frac{\partial u^+ C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{ijk}^{n+1} - u_{ijk}^+ C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1}; \\ \frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{ijk}^- C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}, \end{aligned}$$

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

Компоненты скорости воздушного потока рассчитываются на гранях разностной ячейки. Вторые производные аппроксимируем следующим образом:

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

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

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 расщепляется при интегрировании на временном интервале dt следующим образом:

на первом шаге $k = \frac{1}{4}$:

$$\frac{C_{ijk}^{n+k} - C_{ijk}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k + L_z^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ijk}^k =$$

$$= \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n + M_{zz}^+ C^k + M_{zz}^- C^n),$$

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

$$\frac{C_{ijk}^k - C_{ijk}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k + L_z^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ijk}^k =$$

$$= \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c + M_{zz}^- C^k + M_{zz}^+ C^c),$$

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

$$\frac{C_{ijk}^k - C_{ijk}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k + L_z^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ijk}^k =$$

$$= \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c + M_{zz}^- C^k + M_{zz}^+ C^c),$$

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

$$\frac{C_{ijk}^k - C_{ijk}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k + L_z^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ijk}^k =$$

$$= \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k + M_{zz}^- C^c + M_{zz}^+ C^k),$$

В данные разностные соотношения входит «возмущенный» коэффициент диффузии $\tilde{\mu}$ [5].

Практическая реализация модели. На основе данной разностной схемы разработана программа на алгоритмическом языке DELPHI.

С помощью построенной численной модели выполнен расчет загрязнения атмосферы при горении I ступени ракеты РС-22.

Расчет выполнялся для скорости ветра $u_1 = 4,5 \text{ м/с}$ (на высоте флюгера). При проведении расчетов учитывалась зависимость скорости ветра и коэффициентов диффузии от высоты

$$u = u_1 \left(\frac{Z}{Z_1} \right)^n,$$

где u_1 – значение скорости ветра на высоте Z_1 (высота флюгера); $n \approx 0,15 - 0,69$ (данный параметр зависит от шероховатости поверхности Z_0 , м),

$$\mu_y = k_0 \cdot u, \quad k_0 = 0,1; \quad \mu_z = k_1 \cdot \left(\frac{Z}{Z_1} \right)^m,$$

где Z – высота, на которой определяется величина коэффициента μ_z ; $m \approx 1$,

$$\mu_x = \mu_y.$$

Результаты расчета (концентрация в безразмерном виде) представлена на последующих рисунках.

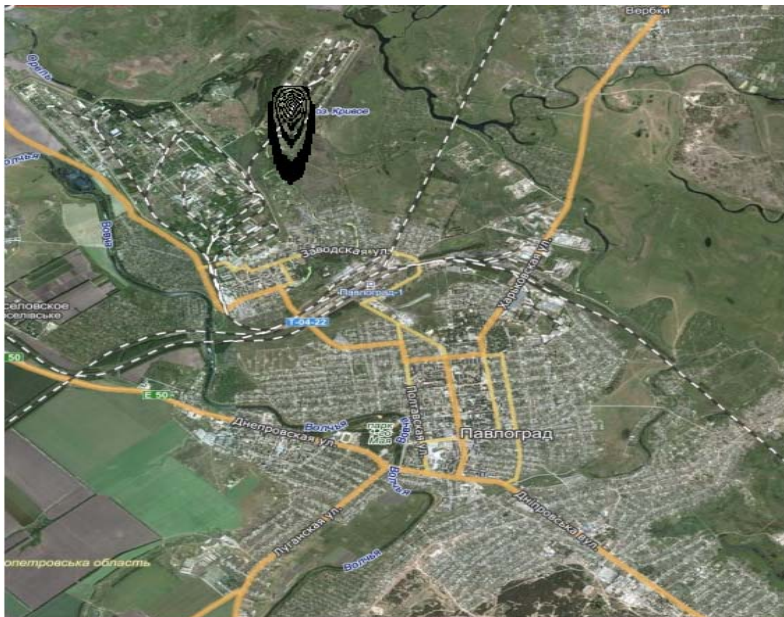


Рис. 3. Зона загрязнения для момента времени $t=600 \text{ сек}$

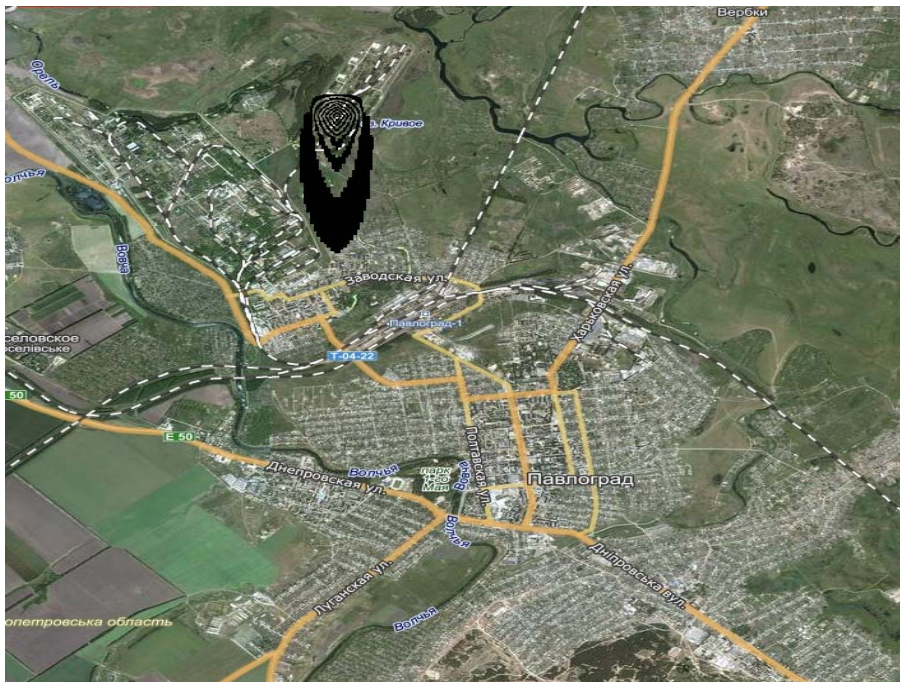


Рис. 4. Зона загрознення для моменту времени $t=1750$ сек

Как видно из представленных рисунков зона загрязнения представляет собой область, которая вытягивается в направлении ветра.

Как видно из рисунков зона загрязнения покрывает достаточно обширный участок местности прилегающий к складу и создает угрозу загрязнения воздушной среды для рабочего поселка размещенного возле завода.

Выводы. В работе построена компьютерная модель и на ее основе разработан эффективный метод расчета динамики загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива. Дальнейшее совершенствование данного направления следует проводить в направлении создания модели для расчета рассеивания тяжелых аэрозолей.

Бібліографічні посилання

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Учебное пособие в 5-ти книгах / Под редакцией В.А. Котляревского и А.В. Забегаева. – М., 2001. – 200 с.
2. Демидов П. Г. Горение и свойства горючих веществ / П.Г. Демидов. – М., 1962. – 254 с.
3. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К., 1997. – 368 с.
4. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г.И. Марчук. – М., 1982. – 320 с.
5. Самарский А. А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М., 1989. – 616 с.

Надійшла до редколегії 18.10.2013.