УДК 519.6

Н. Н. Беляев*, В. И. Ночвай, А. В. Берлов***

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

***Институт проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В МАСШТАБЕ «COUNTY»

Разработана численная модель, позволяющая оперативно рассчитать динамику загрязнения атмосферного воздуха и риска токсичного поражения людей при чрезвычайной ситуации на химически опасном объекте, сопровождающейся выбросом химически опасного вещества. Для расчета рассеивания опасного вещества в атмосферном воздухе использовано двухмерное уравнение переноса примеси, которое учитывает скорость и направление ветра, атмосферную диффузию, интенсивность эмиссии опасного вещества, время эмиссии. Для численного интегрирования уравнения переноса примеси в атмосфере использована неявная разностная схема. Определено, что построенная численная модель относится к классу «operational models», с помощью которой можно оперативно рассчитывать аварийное загрязнение атмосферы для решения задач при разработке плана ликвидации аварийной ситуации. На основе построенной численной модели проведен вычислительный эксперимент по оценке уровня загрязнения атмосферы в масштабе «county» при чрезвычайной ситуации в хранилищах твердого ракетного топлива на Павлоградском химическом заводе. Смоделирована ситуация загрязнения атмосферного воздуха при выбросе HCl при горении твердого ракетного топлива. Рассчитана динамика загрязнения атмосферного воздуха для двух регионов Днепропетровской области, на основе которой можно оценить уровень экологической угрозы в случае масштабной аварии на химически опасном объекте.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, ракетное топливо, численное моделирование.

Розроблено числову модель, за якою можна оперативно розрахувати динаміку забруднення атмосферного повітря та ризику токсичного ураження людей у разі надзвичайної ситуації на хімічно небезпечному об'єкті, що супроводжується викидом хімічно небезпечної речовини. Для розрахунку розсіювання небезпечної речовини в атмосферному повітрі застосовано двовимірне рівняння переносу домішки, яке враховує швидкість і напрям вітру, атмосферну дифузію, інтенсивність емісії небезпечної речовини, час емісії. Для числового інтегрування рівняння переносу домішки в атмосфері застосовано неявну різницеву схему. Побудована числова модель належить до класу «operational models», що дозволяє оперативно розраховувати аварійне забруднення атмосфери під час виконання завдань із розробки плану ліквідації аварійної ситуації. На основі побудованої числової моделі проведено обчислювальний експеримент для оцінки рівня забруднення атмосфери в масштабі «county» у разі надзвичайної ситуації в сховищах твердого ракетного палива у Павлоградському хімічному заводі. Змодельовано ситуацію забруднення атмосферного повітря за умов викиду HCl під час горіння твердого ракетного палива. Розраховано динаміку забруднення атмосферного повітря для двох регіонів Дніпропетровської області, на основі якої можна оцінити рівень екологічної загрози у випадку масштабної аварії на хімічно небезпечному об'єкті.

Ключові слова: забруднення атмосфери, ракетне паливо, числове моделювання.

A numeral model allowing operatively to expect the dynamics of contamination of atmospheric air and risk of toxic defeat of people at an emergency on chemically is worked out dangerous object, attended with the troop landing chemically hazardous substance. To calculate the dispersion of hazardous substances in the ambient air is applied two-dimensional transport equation impurities. The equation takes into account the wind speed and direction, atmospheric diffusion, the intensity of emission of hazardous substances, emission time. For the numerical simulations of impurity transport in the atmosphere is used implicit difference scheme. On the basis of the numerical model is used to compute an experiment to assess the level of air pollution on a scale «county» in the emergency storage

© Н. Н. Беляев, В. И. Ночвай, А. В. Берлов, 2015

of solid rocket propellant on the Pavlograd chemical plant. Model a situation of air pollution in the HCl emission during combustion of solid rocket propellant. Calculated dynamics of air pollution for the two regions of Dnipropetrovsk region.

Key words: air pollution, rocket propellant, numerical simulation.

Постановка задачи. На территории Павлоградского химического завода расположены хранилища (рис. 1) со снаряженными корпусами ракетных двигателей с твердым ракетным топливом (ТРТ) ракеты РС-22 (рис. 2).

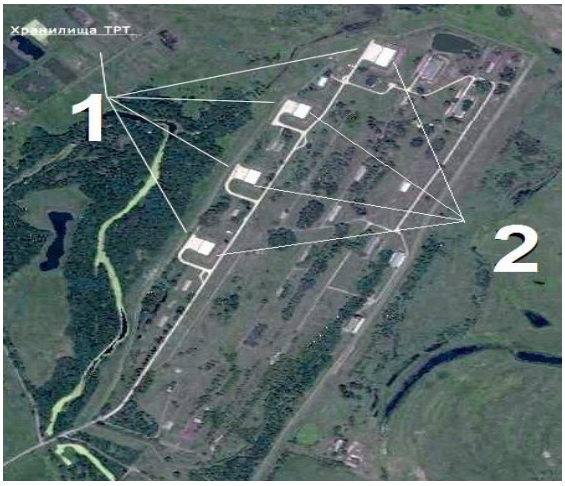

Рис.1. Хранилища твердого ракетного топлива на территории Павлоградского химического завода:
1 – хранилище твердого ракетного топлива, *2* – защитный вал

Рис.2. Межконтинентальная баллистическая ракета РС-22 («*Scalpel*»)

В случае чрезвычайной ситуации, при которой произойдет возгорание данного топлива, в атмосферу начнут поступать химически опасные вещества – продукты горения. Особенностью хранения ТРТ является то, что снаряженные корпуса ракетных двигателей расположены в непосредственной близости друг от друга. Это значит, что в случае возгорания одного снаряженного корпуса произойдет быстрое возгорание соседних топливных блоков, следствием чего будет эмиссия значительного количества опасных веществ (продуктов горении) в атмосферу [11].

Исходя из того, что внутри хранилищ находиться достаточно большая масса топлива, и учитывая возможный масштаб последствий аварийной ситуации, возникает актуальная задача – прогноз динамики загрязнения атмосферы не только в локальном масштабе [4;5], но и в масштабе «county» (перенос загрязнителя на несколько десятков километров). Решение такой задачи позволит получить информацию о масштабах возможного загрязнения соседних районов и оценки риска поражения людей в этих районах.

Рис.3. Вид расчетной области:
1 – Павлоградский район, *2* – Юрьевский район

Анализ последних исследований и публикаций. В Украине для прогноза последствий аварий на химически опасных объектах используются нормативная методика или методика РД 52.04.253-90 [11]. Обе методики основаны на применении эмпирических формул. Недостатком данных методик является отсутствие прямого учета скорости ветра, атмосферной диффузии на процесс формирования зоны загрязнения. В Украине также применяются аналитические модели, и в частности модель Гаусса для прогноза аварийного загрязнения атмосферы [8;9]. Эти модели позволяют оперативно рассчитать зону загрязнения, но для упрощенных ситуаций типа точечного постоянно действующего источника выброса или точечного мгновенного выброса. Кроме того, при применении моделей Гаусса необходимо научное обоснование значений коэффициентов дисперсии для территории Украины, которое в настоящее время отсутствует. Для практики важно иметь гибкие математические модели, которые позволяли бы прогнозировать зону химического загрязнения с максимальным учетом физических факторов, влияющих на процесс переноса и позволяющих оценивать риск токсичного поражения людей. Такие модели получили название «*diagnostic models*» [1 – 6;13].

Цель. Целью данной работы является разработка численной модели для расчета процесса загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива РС-22 и прогнозирование уровня загрязнения атмосферного воздуха при дальнем переносе опасных веществ.

Математическая модель. Рассматриваемая задача относиться к классу прогнозируемых задач оценки аварийного загрязнения атмосферы в случае чрезвычайной ситуации на химически опасных объектах. Как известно, методика решения таких задач должна соответствовать определенным требованиям: быстрота расчета, учет основных физических параметров процесса, возможность

моделирования различных аварийных сценариев (залповый выброс, полунепрерывный и т.д.). Процесс рассеивания загрязнителя в атмосфере основывается на применении осредненного по высоте переноса H уравнения Г.И. Марчука [1–7;10;12]

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+Q(t)\cdot\delta(x-x_0)\cdot\delta(y-y_0), \qquad (1)$$

где C – концентрация примеси (хлористый водород); u, v – компоненты вектора скорости движения ветрового потока; $\mu=(\mu_x,\mu_y)$ – коэффициенты атмосферной диффузии; t – время; Q – интенсивность эмиссии; $x_0,\cdot y_0$ – координаты источника эмиссии; $\delta(x-x_0)$, $\delta(y-y_0)$ – дельта функция Дирака.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [1;2;7;10].

Метод решения. Для численного интегрирования уравнения (1) используется попеременно треугольная неявная разностная схема расщепления [1;2;12].

Результаты численного моделирования. Моделируется следующая ситуация. Полагается, что в результате диверсии на территории Павлоградского химического завода (места расположения хранилищ с ТРТ) происходит выброс химически опасного вещества (HCl). Прогноз загрязнения атмосферы при данной чрезвычайной ситуации проводится при следующих исходных данных: размеры расчетной области $67\,\text{км}\times 62\,\text{км}$; интенсивность эмиссии 20 кг/с (горение пяти снаряженных корпусов двигателей с ТРТ) [11]; выброс осуществляется в течение 1000 с; высота усреднения 600 м; $\sigma=0$; скорость ветра 8 м/с; направление ветра северное, значение коэффициентов диффузии $\mu_x=\mu_y=8$ м^2/ с.

Рассмотрим результаты моделирования, полученные на базе разработанной численной модели. На приведенных ниже рисунках (рис.4–6) представлена динамика формирования зоны загрязнения в атмосфере для различных моментов времени после горении ТРТ.

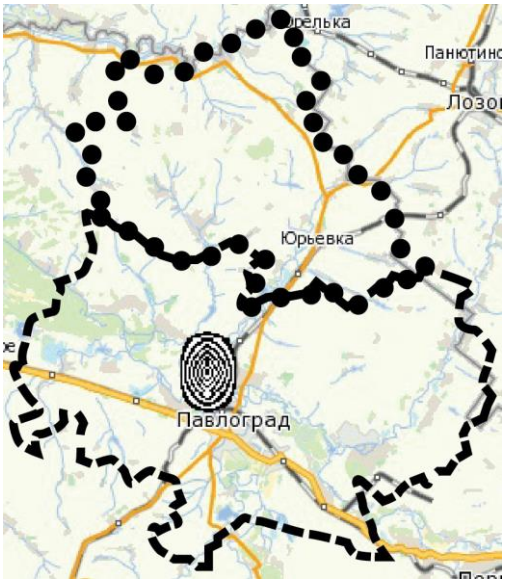

Рис.4. Зона загрязнения атмосферы для момента времени *t* = 5 мин

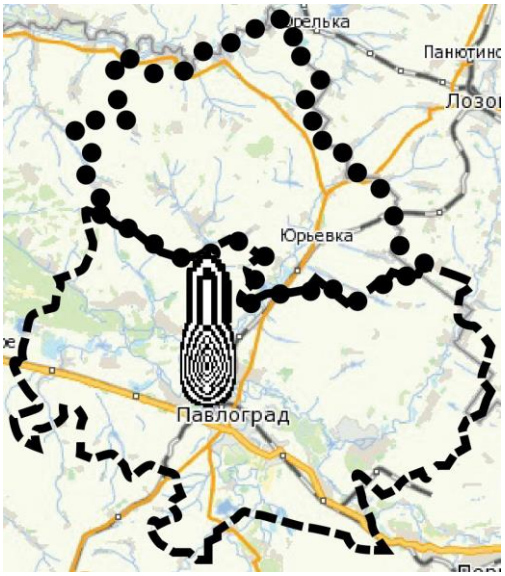

Рис.5. Зона загрязнения атмосферы для момента времени *t* = 10 мин

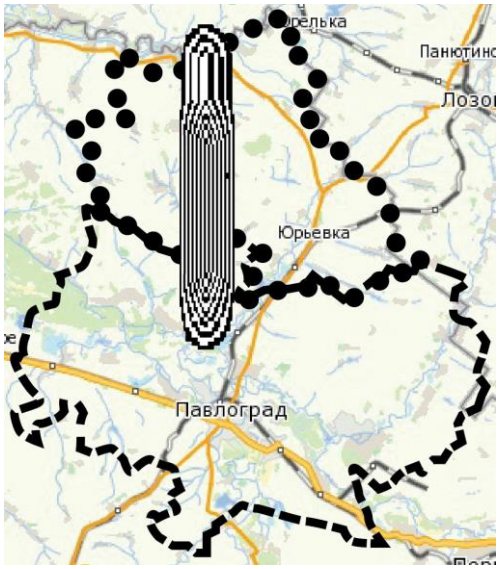

Рис.6. Зона загрязнения атмосферы для момента времени *t* = 27 мин

Хорошо видно, что в течение короткого промежутка времени формируется значительная по размерам зона загрязнения атмосферы. Поскольку процесс эмиссии опасного вещества происходит по типу «полунепрерывный источник», то специфика формирования зоны загрязнения в течение промежутка времени, который соответствует времени горения ТРТ, заключается в образовании шлейфа, исходящего от хранилищ и направленного в сторону движения воздушных масс. Далее зона загрязнения начинает «отрываться» от места расположения хранилищ и сноситься в сторону Юрьевского района как отдельное облако. Из рис. 6 видно, что

примерно через полчаса после возникновения чрезвычайной ситуации в хранилище облако токсичного вещества накрывает значительную часть этого района.

При рассмотрении задач данного класса крайне важным вопросом является прогноз риска токсичного поражения людей. Для оценки риска поражения людей на открытой местности рассчитана относительная концентрация опасного вещества:

$$C_R = \frac{C}{\text{ПДК}}, \qquad (2)$$

где C – концентрация опасного вещества в расчетной точке (граница между Павлоградским и Юрьевским районами Днепропетровской области), $\text{ПДК} = 0{,}2\ \text{мг/м}^3$ – предельно-допустимая концентрация опасного вещества.

В табл.1 представлены значения относительной концентрации опасного вещества на открытой местности на границе двух районов – Павлоградского и Юрьевского.

Таблица 1

Значение концентрации загрязнителя на границе районов

Время t	Концентрация, мг/м^3	Относительная концентрация C_R
22 мин	0,11	0,55
26 мин	0,25	1,27
35 мин	0,83	4,18
40 мин	1,18	5,91

Исходя из данных таблицы, концентрация опасного вещества будет значительно превышать ПДК, что создает угрозу токсичного поражения для людей уже в другом районе.

Выводы. В работе представлена эффективная численная модель для расчета процесса загрязнения атмосферы при выбросе опасных веществ. Результаты проведенного вычислительного эксперимента, полученные на основе разработанной модели, показали, что в случае диверсии на территории Павлоградского химического завода произойдет опасное загрязнение атмосферы на значительном расстоянии от источника эмиссии и загрязнению подвергнуться прилегающие районы. В связи с этим необходимо предусмотреть соответствующие защитные мероприятия, которые бы позволяли снизить риск поражения людей не только на территории завода и города Павлограда, но и в соседних районах области.

Дальнейшее развитие данной тематики следует проводить в направлении создания 3D модели аварийного загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива.

Библиографические ссылки

1. **Беляев, Н. Н.** Математическое моделирование в задачах экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций: монография [Текст] / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина. – Д.: «Акцент ПП», 2013. – 159 с.

2. **Беляев, Н. Н.** Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы: монография [Текст] / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машихина. – Д.: «Акцент ПП», 2014. – 127 с.

3. **Беляев, Н. Н.** Прогнозирование загрязнения приземного слоя атмосферы при горении твердого ракетного топлива в хранилище [Текст] / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов // Зб. наук. пр. НГУ. – 2013. – № 42. – С.160 – 167.

4. **Беляев, Н. Н.** Моделирование процесса загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива [Текст] / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер.: Механіка, 2013. – Вип. 17,Т.1. – С.179 – 184.

5. **Беляев, Н. Н.** Моделирование аварийного загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива [Текст] / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, А. В. Шевченко // Наука та прогрес транспорту. Екологія на транспорті. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2014. – Вип. 5 (53). – С.29 – 38.

6. **Берлов, А. В.** Расчет загрязнения приземного слоя атмосферы при горении твердого ракетного топлива [Текст] / А. В. Берлов // Зб. наук. пр. «Науковий вісник будівництва» – Х.: Харк. нац. ун-т буд-ва та архіт., 2014. – №1(75). – С.185 – 189.

7. **Берлянд, М. Е.** Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы [Текст] / М. Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 273 с.

8. **Гусев, Н. Г.** Радиоактивные выбросы в биосфере [Текст] / Н. Г. Гусев, В. А. Беляев. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.

9. **Израэль, Ю. А.** Экология и контроль состояния природной среды [Текст] / Ю. А. Израэль. – М.: Гидрометеоиздат, 1984. – 560 с.

10.**Марчук, Г. И.** Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г. И. Марчук – М.: Наука, 1982. – 320 с.

11.**Устименко, Е. Б.** К вопросу об экологических последствиях утилизации ракетных двигателей твердого топлива методом взрывания [Текст] / Е. Б. Устименко // Наук. вісн. НГУ. – 2008. – № 5. – С.78 – 82.

12.Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.

13.**Biliaiev, M.** Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography [Text] / M. Biliaiev // Springer: Air Pollution Modeling and its Application XXI. – 2012. – PP.87 – 91.

Надійшла до редколегії 10.06.2015

УДК 539.374

И.С. Онищенко

Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

ИЗМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТЕКУЧЕСТИ ПОСЛЕ КОНЕЧНОЙ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В рамках сформулированных гипоупруговязкопластических определяющих соотношений теории микродеформации, чувствительной к скорости деформации и температуре исследовано изменение поверхности текучести при конечной деформации. Для построения поверхности текучести использованы результаты решения задачи о конечной вязкопластической деформации тонкостенной трубки при комбинированном нагружении. Задача о конечной

© И.С. Онищенко, 2015