

УДК 622.012: 502.3

Н. Н. БЕЛЯЕВ – д. т. н., профессор, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, кафедра «Гидравлика и водоснабжение»

Е. Ю. ГУНЬКО – к. т. н., доцент Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, кафедра «Гидравлика и водоснабжение»

А. В. БЕРЛОВ – инженер, Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, кафедра «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЕДАНИЯ КИСЛОТНОГО ДОЖДЯ, КАК ПОСЛЕДСТВИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ В ХРАНИЛИЩЕ С ТВЕРДЫМ РАКЕТНЫМ ТОПЛИВОМ

Статью представил к. т. н., приват-проф. Л. Ф. Долина

Постановка проблемы

Одним из потенциальных источников экологической опасности в Днепропетровском регионе является твердое ракетное топливо (ТРТ) ракеты РС-22. Это топливо находится в хранилищах на территории Павлоградского химического завода (рис.1). Оно хранится в виде снаряженных двигателей первой, второй и третьей ступеней (рис.2). Существует угроза теракта на территории данного предприятия.

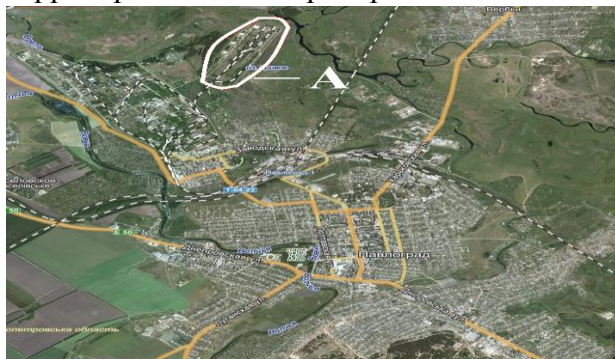


Рис. 1. Положение хранилища твердого ракетного топлива (зона А) возле г. Павлоград

Результатом такого теракта может быть детонация топлива и выброс в атмосферу большого количества химически опасных веществ. Поскольку рядом с хранилищем находится г. Павлоград (см. рис. 1), то воз-

никает актуальная задача – прогноз динамики загрязнения атмосферы при теракте в случае детонации твердого ракетного топлива и оценка риска токсичного поражения людей в г. Павлоград. Специфической особенностью последствий данного теракта является то, что может образоваться кислотный дождь.



Рис. 2. Твердое ракетное топливо ракеты РС-22

Анализ последних исследований и публикаций

Для прогноза последствий аварий на химически опасных объектах и транспорте в Украине применяется нормативная методика, методика ОНД-86 или методика РД 52.04.253-90 [8]. Недостатком этих методик

является отсутствие прямого учета скорости ветра, атмосферной диффузии на процесс формирования зоны загрязнения. Для решения задач данного класса также применяются различные аналитические модели и модель Гаусса [2, 3, 12]. Данные модели позволяют оперативно рассчитать зону загрязнения, но для упрощенных ситуаций типа точечный постоянно действующий источник выброса или точечный мгновенный выброс [2, 12]. Для применения модели Гаусса необходимо научное обоснование значений коэффициентов дисперсии для территории Украины, которое в настоящее время - отсутствует. В настоящее время, для практики важно иметь методики расчета, которые позволяли бы прогнозировать зону химического загрязнения с максимальным учетом физических факторов, влияющих на процесс переноса и требующие небольших затрат компьютерного времени [1, 5, 6, 10, 11, 13].

Цель

Целью данной работы является разработка численной модели для расчета процесса формирования и оседания кислотного дождя при детонации твердого ракетного топлива РС-22. При детонации происходит выброс в атмосферу паров HCl. Выброс HCl в атмосферу приводит к взаимодействию этого вещества с парами воды в атмосфере, что является причиной образования соляной кислоты и появлению кислотного дождя. В этой связи возникает важная проблема в области экологической безопасности – оценка масштаба уровня загрязнения подстилающей поверхности.

Методика

Для моделирования формирования кислотного дождя используется усредненное

по высоте переноса Н уравнения Г.И. Марчука [1, 2, 5, 9]

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

где C – массовая концентрация продукта детонации – паров HCl в атмосфере; u, v – усредненное значение компонент вектора скорости ветра; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – турбулентные коэффициенты атмосферной диффузии; t – время; Q – усредненное значение мощности эмиссии опасного вещества; σ – коэффициент, учитывающий изменение концентрации опасного вещества за счет химических реакций, вымывания осадками и взаимодействия с подстилающей поверхностью [6]; $\delta(x - x_i), \delta(y - y_i)$ – дельта-функции Дирака; x_i, y_i – координаты расположения точечного источника эмиссии опасного вещества.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [1, 5, 9].

Данное уравнение также применяется для моделирования распространения водяных паров в расчетной области (здесь параметр C описывает массовую концентрацию водяных паров) и массовую концентрацию соляной кислоты. На входе в расчетную область задается постоянное значение концентрации водяных паров, которые поступают в расчетную область с ветром, а концентрация соляной кислоты на границе втекания воздушных масс равна нулю. Концентрация водяных паров в зоне их взаимодействия с парами HCl – меняется. При моделировании полагалось, что в атмосфере возможно максимальное образование 20% раствора соляной кислоты. Такая концентрация означает, что в 100 г раствора будет находиться 20 г кислоты и 80 г

воды. Таким образом, мы имеем соотношение на основе которого можно рассчитать как убывает количество паров HCl и водяных паров при образовании соляной кислоты.

Количество соляной кислоты, оседающей на подстилающую поверхность, рассчитывается следующим образом:

$$G = \int_{t_1}^{t_2} \iint_{\Delta R} w_s C dR dt, \quad (2)$$

где w_s – скорость гравитационного оседания капель соляной кислоты, R – площадь земной поверхности.

Алгоритм решения

Алгоритм решения задачи по образованию кислотного дождя и его выпадению на землю заключается в следующем:

1. Осуществляется расчет распределения концентрации паров HCl в атмосфере на данный момент времени.
2. Осуществляется расчет распределения концентрации водяных паров в атмосфере на данный момент времени.
3. Рассчитывается количество (масса) образовавшейся соляной кислоты с условием, что в атмосфере возможно максимальное образование 20% раствора кислоты.
4. Осуществляется расчет миграции соляной кислоты в атмосфере на базе уравнения (1).
5. Рассчитывается изменение концентрации паров HCl и водяных паров в атмосфере с учетом того, что их часть ушло на образование соляной кислоты.
6. Рассчитывается изменение концентрации соляной кислоты в атмосфере за счет ее гравитационного оседания на поверхность земли. Формула пересчета нового значения концентрации соляной кислоты в каждой разностной ячейке на новый момент времени $(n+1)$ рассчитывается так:

$$C_{ij}^{n+1} = C_{ij}^n - \frac{C_{ij}^n \cdot w_s}{H} dt, \quad (3)$$

где C_{ij}^n – концентрация соляной кислоты в атмосфере на момент времени n ;

C_{ij}^{n+1} – концентрация соляной кислоты в атмосфере на момент времени $n+1$;

w_s – скорость оседания капель соляной кислоты;

H – высота усреднения; dt – шаг по времени.

7. Осуществляется расчет количества соляной кислоты, осевшей на поверхность земли.

8. На карте осуществляется построение зоны загрязнения земной поверхности вследствие оседания соляной кислоты.

9. Повторяется расчет на новый промежуток времени.

Скорость оседания капель соляной кислоты принималась равной $w_s = 1$ см/с [4].

Численное интегрирование моделирующих уравнений

Для численного интегрирования уравнения (1) используется попеременно – треугольная неявная разностная схема расщепления [1,5,7, 9]. Текст программы написан на языке FORTRAN.

Практическая реализация численной модели

Решение задачи по образованию кислотного дождя и его выпадению на землю проводится при следующих исходных данных: размеры расчетной области 12000м*6300м; Координаты источника эмиссии (хранилища) $x=1200$ м, $y=3150$ м.

Относительная влажность воздуха принималась 74% (среднегодовая влажность для Днепропетровской области, температу-

ра воздуха 20°C , содержание водяных паров в этом случае составляет 1,3 кг на 100 м^3 воздуха), скорость ветра составляла 3 м/с, значение коэффициентов атмосферной диффузии $\mu_x = \mu_y = 1,5\text{ м}^2/\text{с}$. Моделировалась ситуация выброса HCl в случае детонации трех первых ступеней ТРТ, каждый массой по 6855 кг [8].

Результаты

На последующих рисунках показана зона подстилающей поверхности, куда осели капли соляной кислоты.

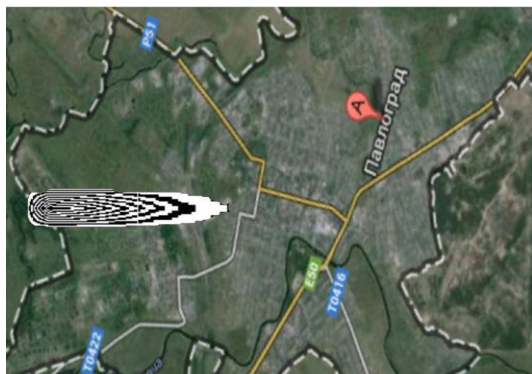


Рис. 3. Зона земной поверхности, подвергшаяся кислотному дождю (момент времени $t = 12$ мин)



Рис. 4. Зона земной поверхности, подвергшаяся кислотному дождю (момент времени $t = 34$ мин)

Как видно из представленных рисунков поверхность земли, подвергшаяся кислотному дождю, быстро увеличивается в размерах с течением времени. Для практики,

чтобы оценить масштаб экологического загрязнения, крайне важно знать массу кислоты, попавшей на поверхность земли. В табл.1 представлено значение массы соляной кислоты, которая осела на земную поверхность за определенный промежуток времени после детонации ступени ТРТ.

Таблица 1

Масса кислоты, которая осела на земную поверхность

Время, мин	Масса кислоты, кг	Площадь, которая подверглась кислотному дождю, м^2
23	471	$152 \cdot 10^5 \text{ м}^2$
32	655	$203 \cdot 10^5 \text{ м}^2$
39	797	$216 \cdot 10^5 \text{ м}^2$
45	914	$224 \cdot 10^5 \text{ м}^2$

Как видно из данной таблицы, в случае чрезвычайной ситуации произойдет масштабное загрязнение земной поверхности в случае осадения кислотного дождя.

На втором этапе было выполнено моделирование иного сценария – осуществляется выброс HCl от одного двигателя ТРТ первой ступени, т.е. в атмосферу поступает 6855 кг HCl. Но рассматривается сценарий, когда изменяется метеорологическая ситуация. На интервале времени $[0...10\text{мин}]$ скорость ветра составляет 5 м/с, значение коэффициентов атмосферной диффузии $\mu_x = \mu_y = 2,5\text{ м}^2/\text{с}$, а далее изменяется скорость ветра и направление: скорость становится равной 7,5 м/с, а направление ветра (северо-восточное). Таким образом, моделируется влияние изменения метеорологической ситуации на характер загрязнения земной поверхности кислотным дождем. На последующих рисунках (рис. 5-7) показано как формируется зона загрязнения земной поверхности до изменения метеоситуации и после.

Хорошо видно, что до изменения метеоситуации зона загрязнения земной поверхности вытягивается в направлении г. Павлоград, а после изменения метеоситуации – она вытягивается и захватывает южную часть г. Павлограда. Ниже в табл. 2 представлено прогнозное значение массы соляной кислоты, которая осела на земную поверхность.

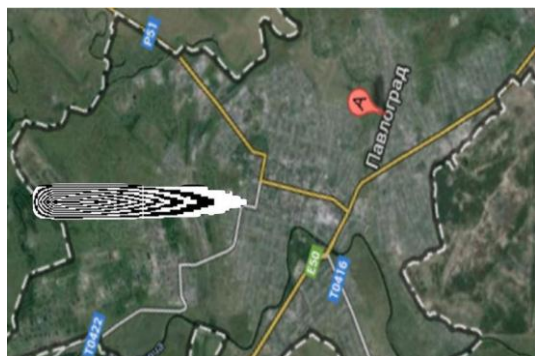


Рис. 5. Зона земной поверхности, подвергаясь кислотному дождю (момент времени $t = 8$ мин)



Рис. 6. Зона земной поверхности, подвергаясь кислотному дождю (момент времени $t = 16$ мин, изменилось направление ветра)

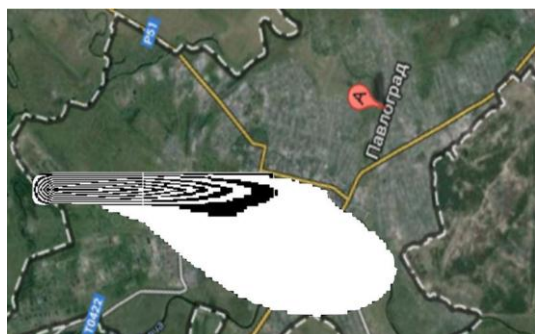


Рис. 7. Зона земной поверхности, подвергаясь кислотному дождю (момент времени $t = 20$ мин, изменилось направление ветра)

Здесь необходимо отметить, что изменение метеоситуации приводит к формированию зоны загрязнения, имеющей сложную геометрическую форму. Таким образом, разработанная прогнозная модель позволяет решить не только классическую задачу прогноза формирования зон химического заражения, но и другую крайне важную задачу – прогноз формирования кислотного дождя и его осаждение на поверхность земли в случае чрезвычайной ситуации на рассматриваемом химически опасном объекте.

Таблица 2

Масса кислоты, которая осела на земную поверхность

Время, мин	Масса кислоты, кг	Площадь, которая подверглась кислотному дождю, m^2
7	47	$65 \cdot 10^5 m^2$
10	68	$94 \cdot 10^5 m^2$
32	156	$360 \cdot 10^5 m^2$

Выводы

В работе представлена численная модель для расчета процесса загрязнения атмосферы и формирования кислотного дождя при выбросе продуктов детонации твердого ракетного топлива.

Для расчета рассеивания загрязняющего вещества в атмосферном воздухе используется двухмерное уравнение переноса примеси. Дальнейшее развитие данной тематики следует проводить в направлении создания 3-D модели аварийного загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации в хранилище ТРТ.

Библиографический список

1. Беляев, Н. Н. Защита атмосферы от загрязнения при миграции токсичных веществ [Текст]/ Н. Н. Беляев, В. М. Лисняк – Д.: ООО «Инновация», 2006. – 150 с.

2. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы [Текст]/ М. Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
3. Гусев, Н. Г. Радиоактивные выбросы в биосфере [Текст]/ Н. Г. Гусев, В. А. Беляев. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 257 с.
4. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды [Текст]/ Ю. А. Израэль. – М.: Гидрометеиздат, 1984. – 560 с.
5. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст]/ Г. И. Марчук – М.: Наука, 1982. – 320 с.
6. Машихина, П. Б. Моделирование распространения примеси в атмосфере с учетом рельефа местности [Текст]/ П. Б. Машихина // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 27. – С. 138-142.
7. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст]/ Самарский А. А. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
8. Устименко, Е. Б. К вопросу об экологических последствиях утилизации ракетных двигателей твердого топлива методом взрывания [Текст]/ Е. Б. Устименко // Науковий вісник НГУ. – 2008. – № 5. – С. 78-82.
9. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст]/ М. З. Згуровский и др. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
10. Шереметьева, У. М. Моделирование процессов распространения токсичных компонентов топлива при эксплуатации жидкостных ракет [Текст]: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. физ. мат. наук : спец. 01.02.05 «Механика жидкости газа и плазмы» / У. М. Шереметьева. – Томск, 2006. – 26 с.
11. 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.
12. Hanna, S. Air Quality Modelling over Short Distances [Text] / S. Hanna – College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling. – 16 May–3 June, 1994. – № SMR/760–2 – P. 712–743.
13. Tracking and predicting the atmospheric dispersion of hazardous material releases. Implications for Homeland Security [Text] / National research council. Committee on the Atmospheric Dispersion of Hazardous Material Releases Board on Atmospheric Sciences and Climate Division on Earth and Life Studies. – USA, Washington, D.C. – 2003. – 101 p.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, ракетне паливо, кислотний дощ, чисельне моделювання

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, ракетное топливо, кислотный дождь, численное моделирование

Keywords: emergency, rocket propellant, acid rain, numeral simulation

Надійшла до редколегії 01.06.2012