

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 622.012: 502.3

Н. Н. БЕЛЯЕВ<sup>1\*</sup>, А. В. БЕРЛОВ<sup>2\*</sup>, А. В. ШЕВЧЕНКО<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Каф. «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара, ул. Казакова, 18, корп. № 14, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 760 92 07, эл. почта berlov@bigmir.net, ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>3\*</sup>Главное управление МЧС Украины в Днепропетровской области, ул. Короленко, 4, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (056) 744 25 87, эл. почта dnipro@fireman.dp.ua, ORCID 0000-0001-9907-3610

### МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ В ХРАНИЛИЩЕ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

**Цель.** Разработка прикладной численной модели для расчета динамики загрязнения атмосферы над городом при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива, сопровождающейся выбросом в атмосферу продуктов горения. **Методика.** Для численного моделирования процесса переноса опасного вещества (продукта горения твердого ракетного топлива) в атмосфере применяется уравнение конвективно-диффузионного переноса примеси. Данное уравнение учитывает рассеивание в атмосфере опасного вещества за счет ветра и атмосферной диффузии. Для расчета процесса загрязнения воздушной среды внутри помещений при затекании в них загрязненного атмосферного воздуха используется балансовая модель. Эта модель учитывает величину воздухообмена в помещении, объем помещения и концентрацию опасного вещества во входящем в помещение потоке. Величина фильтрующегося воздуха в помещении рассчитывается с помощью эмпирической модели. Для численного интегрирования уравнения переноса примеси в атмосфере применяется неявная разностная схема расщепления. На основе построенной численной модели создан код на алгоритмическом языке Фортран. Проведен вычислительный эксперимент по оценке уровня загрязнения атмосферы над г. Павлоградом и воздушной среды внутри помещений. **Результаты.** Предложенная модель позволяет оперативно рассчитать загрязнение атмосферы при выбросе химически опасного вещества. Модель позволяет определить размеры зоны токсичного поражения людей. С помощью разработанной численной модели выполнена оценка риска поражения людей в селитебной зоне г. Павлоград. **Научная новизна.** Создана численная модель, позволившая оперативно оценить риск токсичного поражения людей в г. Павлоград в случае чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива. **Практическая значимость.** Разработанная численная модель может быть использована для оценки риска поражения людей на открытом воздухе или внутри помещений при эмиссии химически опасных веществ в атмосферу. С помощью разработанной численной модели решена задача по оценке последствий для населения при возгорании твердого ракетного топлива в хранилище.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферы; ракетное топливо; инфильтрация опасных веществ в помещение; численное моделирование

#### Введение

На территории Павлоградского химического завода (рис. 1) находятся хранилища (рис. 2)

с твердым ракетным топливом ракеты РС-22 (рис. 3). В случае чрезвычайной ситуации и возгорания топлива в атмосферу начнут посту-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

пять химически опасные вещества – продукты горения. Исходя из того, что внутри хранилищ находится достаточно большая масса топлива и сами хранилища располагаются вблизи города (см. рис. 1) возникает актуальная задача – прогноз динамики загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации и оценка риска токсичного поражения людей в городе [1–4, 6, 7].



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

Fig. 1. Storage of solid rocket propellant (zone A) near city Pavlograd



Рис. 2. Здания – хранилища с твердым ракетным топливом на территории Павлоградского химического завода

Fig. 2. Buildings with a solid rocket propellant on the territory of Pavlograd chemical plant

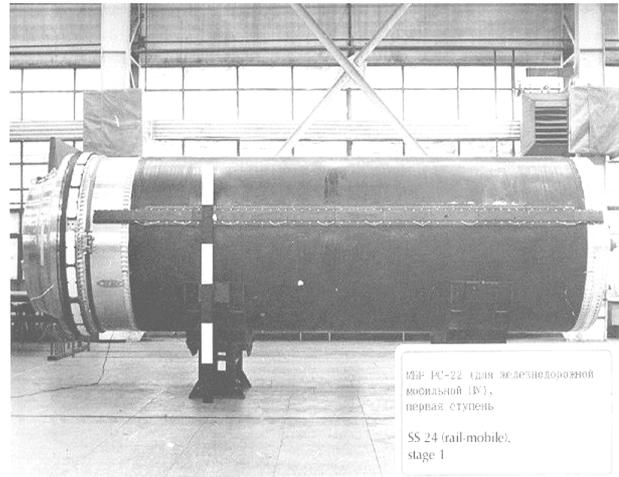


Рис. 3. Твердое ракетное топливо первой ступени ракеты РС-22

Fig. 3. Solid rocket propellant of the first stage of rocket RS-22

### Цель

Цель работы – разработка прикладной численной модели для расчета процесса загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива и прогнозирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в жилой зоне в случае чрезвычайной ситуации в хранилище.

*Анализ публикаций.* В Украине в настоящее время для прогноза последствий аварий на химически опасных объектах широко используется нормативная методика, которая основана на ряде эмпирических зависимостей. Недостатком этой методики является отсутствие прямого учета скорости ветра, атмосферной диффузии, времени эмиссии химически опасного вещества на процесс формирования зоны загрязнения. Кроме этой модели в Украине применяются аналитические модели и в частности модель Гаусса. Модели данного класса позволяют оперативно рассчитать зону загрязнения, но для модельных ситуаций типа точечный постоянно действующий источник или точечный мгновенный выброс [8]. Для практики важно иметь более 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 как на открытом пространстве, так и внутри помещений.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

*Постановка задачі.* Рассматривается рассеивание в атмосфере токсичного вещества (хлористый водород), попавшего в нее при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива (рис. 2). Известна интенсивность выброса загрязняющего вещества и продолжительность эмиссии опасного вещества по времени (время горения). Необходимо исследовать динамику загрязнения атмосферы при заданных параметрах метеоситуации и оценить риск токсичного поражения людей как на открытом пространстве, так и внутри помещений.

**Методика**

Процесс рассеивания токсичных продуктов горения твердого ракетного топлива в атмосфере основывается на применении осредненного по высоте переноса  $H$  уравнения Г. И. Марчука [2–5; 8–10; 12, 14]

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

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

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [2, 5, 8].

*Модель инфильтрации загрязненного наружного воздуха в здание.* В данной работе процесс загрязнения воздушной среды в помещении описывается следующим уравнением (нульмерная модель) [13, 15]

$$V \frac{dC}{dt} = QC_{np} - QC, \quad (2)$$

где  $C_{np}$  – концентрация загрязнителя в приточном воздухе;  $C$  – концентрация опасного вещества в выходящем из помещения воздухе;  $V$  – объем комнаты;  $Q$  – интенсивность воздухообмена;  $t$  – время. При применении модели

(2) полагается, что концентрация загрязнителя в помещении равна  $C$ .

Интенсивность воздухообмена рассчитывается с помощью следующего уравнения [15]

$$Q = ELA \sqrt{f_s^2 |\Delta T| + f_w^2 U^2}, \quad (3)$$

где  $f_s$  – параметр, учитывающий процесс инфильтрации через потолок и пол;  $f_w$  – параметр, учитывающий наличие возле здания иных объектов;  $ELA$  – площадь инфильтрации;  $\Delta T$  – перепад температур между температурой внутри помещения и снаружи;  $U$  – скорость ветра. При расчетах полагалось, что параметры  $f_s, f_w$  равны 0,15.

*Численное интегрирование моделирующих уравнений.* Для численного интегрирования уравнения (1) используется попеременно – треугольная разностная схема расщепления [2, 12]. Для численного интегрирования уравнения (2) используется метод Эйлера [11].

*Практическая реализация численной модели.* Построенная численная модель была использована для экспресс-прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха над г. Павлоград при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива, расположенного на территории Павлоградского химического завода. Численное моделирование выполнялось при следующих исходных данных: размеры расчетной области 12 000 м × 6 300 м; интенсивность эмиссии – 100 ед (безразмерная); выброс осуществляется в течение 900 с; загрязняющее вещество – хлористый водород; высота усреднения – 600 м; скорость ветра – 6 м/с; направление ветра – северо-восточное (это направление можно считать одним из наиболее опасных, с той точки зрения, что при данном направлении в зону действия источника попадают жилые районы города), значение коэффициентов атмосферной диффузии по обоим направлениям – 5 м<sup>2</sup>/с; объем комнаты – 51 м<sup>3</sup>; площадь щелей в комнате, через которые происходит инфильтрация загрязненного наружного воздуха – 0,0055 м<sup>2</sup>; разница в температуре наружного атмосферного воздуха и воздуха внутри помещения – 5 °С. Координаты источника эмиссии (хранилища)  $x = 1\ 200$  м,  $y = 3\ 150$  м; координаты первого рецептора – здания в начале селитебной зоны

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

г. Павлограда (рис. 2)  $x = 6\,480$  м,  $y = 2\,850$  м; координати второго рецептора – здания в конце селитебной зоны г. Павлограда (рис. 1)  $x = 11\,280$  м,  $y = 2\,850$  м. На рис. 4 положение рецепторов схематично показано белым «кружком» с цифрой 1 и 2.

## Результаты

Рассмотрим результаты моделирования, полученные на базе разработанной численной модели. На приведенных ниже рисунках представлена динамика формирования зоны загрязнения в атмосфере для различных моментов времени после начала горения топлива.

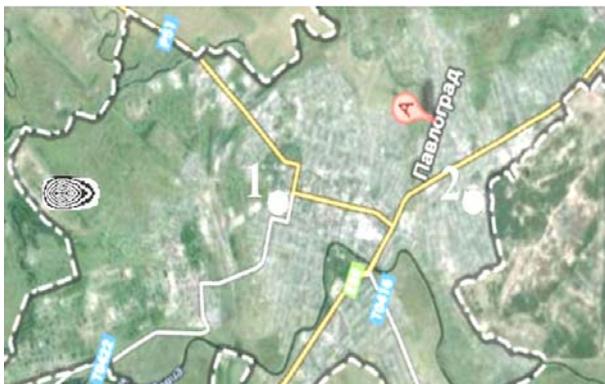


Рис. 4. Зона загрязнения через 3 минуты после начала горения топлива:

1 – положение первого рецептора в жилой зоне,  
2 – положение второго рецептора

Fig. 4. Contamination area for time  $t = 3$  min after the beginning of the accident:

1 – position of the first receptor in a urban district,  
2 – position of the second receptor



Рис. 5. Зона загрязнения через 7 минут после начала горения топлива

Fig. 5. Contamination area for time  $t = 7$  min after the beginning of the accident



Рис. 6. Зона загрязнения через 15 минут после начала горения топлива

Fig. 6. Contamination area for time  $t = 15$  min after the beginning of the accident



Рис. 7. Зона загрязнения через 19 минут после начала горения топлива

Fig. 7. Contamination area for time  $t = 19$  min after the beginning of the accident



Рис. 8. Зона загрязнения через 21 минуту после начала горения топлива (процесс горения прекратился)

Fig. 8. Contamination area for time  $t = 21$  min after the beginning of the accident (the process of burning has completed)

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Как видно из рис. 4–6, в течение промежутка времени, когда процесс горения продолжается, зона загрязнения интенсивно вытягивается по направлению ветра, а максимум концентрации и зона загрязнения с наибольшим градиентом концентрации находится непосредственно вблизи хранилища. После прекращения горения максимум концентрации находится в центре облака, которое мигрирует через город (рис. 7, 8).

*Оценка риска токсичного поражения людей в селитебной зоне.* Поскольку крайне важным вопросом является прогноз токсичного поражения людей в городе, то в разработанной программе осуществляется расчет и вывод на печать концентрации опасного вещества в любой ячейке, находящейся на территории селитебной зоны. Ниже в таблицах представлены прогнозные данные относительно величины концентрации опасного вещества на открытой местности и внутри помещения для двух рецепторов, которые условно обозначены цифрой 1, 2 на рис. 4. Это начало селитебной зоны города и конец селитебной зоны.

Таблица 1

**Среднее значение концентрации опасного вещества в атмосферном воздухе в начале селитебной зоны г. Павлоград**

Table 1

**The median concentration of hazardous substances in the air at the beginning of the Pavlograd residential areas**

Время после аварии в хранилище, мин	Концентрация опасного вещества в атмосферном воздухе, С [мг/м <sup>3</sup> ]	Превышение ПДК (С/ПДК)
20	15,6	78
30	18,02	90
40	1,49	7,4
50	0,02	0,1

Как видно из данных таблиц, в случае аварийного выброса на территории Павлоградского химического завода, создается риск токсичного поражения людей в г. Павлоград с летальным исходом.

Следует отметить, что для задач рассматриваемого класса особую важность представляют оценка риска смертельного поражения людей

при эмиссии химически опасных веществ в атмосферу. Под риском здесь будем понимать количество людей попавших в зону, где концентрация химического вещества превышает величину поражающей концентрации, которая для хлористого водорода составляет порядка 4,5 мг/м<sup>3</sup>. В состав разработанного кода входит подпрограмма «ZONA», которая рассчитывает, где в области концентрация загрязнителя равна или превышает это пороговое значение. На основе этих данных формируется массив, который определяет те разностные ячейки, которые соответствуют зоне поражения. На основе этой информации на карте строится данная зона поражения, которая позволяет быстро оценить размеры зоны, опасной для жизни.

Таблица 2

**Значение концентрации опасного вещества внутри помещения (здание находится в начале селитебной зоны г. Павлоград)**

Table 2

**Concentration value of the dangerous substance inside the premises (the building is located at the beginning of the Pavlograd residential areas)**

Время после аварии в хранилище, мин	Концентрация опасного вещества внутри помещения, С [мг/м <sup>3</sup> ]	Превышение ПДК (С/ПДК)
20	1,28	6,43
30	4,86	24
40	5,20	26
50	4,35	21

Таблица 3

**Среднее значение концентрации опасного вещества в атмосферном воздухе в конце селитебной зоны г. Павлоград**

Table 3

**The median concentration of hazardous substances in the air at the end of the Pavlograd residential areas**

Время после аварии в хранилище, мин	Концентрация опасного вещества в атмосферном воздухе, С [мг/м <sup>3</sup> ]	Превышение ПДК (С/ПДК)
35	17,8	89
50	6,1	30
60	0,48	2,4

Таблица 4

**Значение концентрации опасного вещества внутри помещения (здание находится в конце селитебной зоны г. Павлоград)**

Table 4

**Concentration value of the dangerous substance inside the premises (the building is at the end of the Pavlograd residential areas)**

Время после аварии в хранилище, мин	Концентрация опасного вещества внутри помещения, С [мг/м <sup>3</sup> ]	Превышение ПДК (С/ПДК)
35	2,06	10,3
50	5,14	25
60	4,60	23

Кроме этого указанная подпрограмма сразу рассчитывает площадь зоны поражения и зная среднюю плотность населения для данного города (1 855 человек/км<sup>2</sup>) определяет количество погибших людей:

$$D = S'_D P, \quad (4)$$

где  $D$  – количество погибших людей;  $S'_D$  – площадь зоны поражения;  $P$  – плотность населения.



Рис. 9. Зона смертельного поражения на открытой местности для момента времени  $t = 25$  минут после аварии (в данной зоне концентрация опасного вещества была равна или превысила 4,5 мг/м<sup>3</sup>), скорость ветра 6 м/с

Fig. 9. Zone of hitting for time  $t = 25$  min after the accident (in this zone the concentration of hazardous substance was equal to or exceeded 4.5 mg/m<sup>3</sup>), speed of wind is 6 m/sec

Если рассматривается ситуация, когда люди находятся на открытом пространстве, то в зону смертельного поражения попадает порядка 5 400 человек. Зона смертельного поражения для указанной метеоситуации показана на рис. 9.

Изменения скорости ветра оказывает естественное влияние на темп формирования зоны поражения. Так на рис. 10 показана эта зона для скорости ветра 4 м/с. Сравнивая этот рисунок с предыдущим, видим, что длина зоны поражения к моменту времени  $t = 25$  минут меньше, чем для предыдущего сценария.

Рис. 10. Зона смертельного поражения на открытой местности для момента времени  $t = 25$  минут после аварии (в данной зоне концентрация опасного вещества была равна или превысила 4,5 мг/м<sup>3</sup>), скорость ветра 4 м/с



Рис. 10. Зона смертельного поражения на открытой местности для момента времени  $t = 25$  минут после аварии (в данной зоне концентрация опасного вещества была равна или превысила 4,5 мг/м<sup>3</sup>), скорость ветра 4 м/с

Fig. 10. Zone of hitting for time  $t = 25$  min after the accident (in this zone the concentration of hazardous substance was equal to or exceeded 4.5 mg/m<sup>3</sup>), speed of wind is 4 m/sec

Таким образом, в случае чрезвычайной ситуации в хранилище с твердым ракетным топливом возможно массовое поражение людей в селитебной зоне.

В заключение отметим, что расчет задачи на базе разработанной модели составляет порядка 2 с компьютерного времени.

#### Научная новизна и практическая значимость

Создана численная модель, позволяющая оперативно рассчитать динамику загрязнения атмосферного воздуха и риска токсичного поражения людей при чрезвычайной ситуации в хранилище с твердым ракетным топливом.

Особенностью построенной модели является использование стандартной исходной информации и быстрота в получении расчетных данных, что важно при проведении серийных расчетов по оценке размеров зон поражения.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

**Выводы**

В работе представлена новая численная модель для расчета процесса загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива и прогнозирования уровня загрязнения атмосферного воздуха в селитебной зоне над г. Павлоград в случае чрезвычайной ситуации в хранилище.

Для расчета рассеивания опасного 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.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Авария и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий : в 5-ти кн. : учеб. пособие / ред. В. А. Котляревский, А. В. Забегаев. – М. : Изд-во АСВ, 2001.
2. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование в задачах экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина. – Днепропетровск : «Акцент ПП», 2013. – 159 с.
3. Беляев, Н. Н. Прогнозирование загрязнения приземного слоя атмосферы при горении твердого ракетного топлива в хранилище / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов // Зб. наук. пр. НГУ. – Д., 2013. – № 42. – С.160–167.
4. Берлов, А. В. Расчет загрязнения приземного слоя атмосферы при горении твердого ракетного топлива / А. В. Берлов // Наук. вісн. будва : зб. наук. пр. – Х., 2014. – № 1 (75). – С. 185–189.
5. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеоздат, 1985. – 273 с.
6. Гусев, Н. Г. Радиоактивные выбросы в биосфере / Н. Г. Гусев, В. А. Беляев. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 257 с.
7. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – М. : Гидрометеоздат, 1984. – 560 с.
8. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Марчук Г. И. – М. : Наука, 1982. – 320 с.
9. Машихина, П. Б. Моделирование распространения примеси в атмосфере с учетом рельефа местности / П. Б. Машихина // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 27. – С. 138–142.
10. Русакова, Т. И. Прогнозирование загрязнения воздушной среды от автотранспорта на улицах и в микрорайонах города / Т. И. Русакова // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – 2013. – № 6 (48). – С. 32–45.
11. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1983. – 616 с.
12. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К. : Наук. думка, 1997. – 368 с.
13. Эльтерман, В. М. Вентиляция химических производств / В. М. Эльтерман. – 3-е изд., перераб. – М. : Химия. – 1980. – 288 с.
14. Biliaiev, M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // Air Pollution Modeling and it's Application XXI, NATO SPS Series C : Environmental Security, 2012. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15.
15. Effectiveness of Urban Shelter-in-Place II: Residential Districts / W. R. Chan, W. W. Nazaroff, P. N. Price, A. J. Gadgil. – Atmospheric Environment. – 2007. – Iss. 41. – P. 4962–4976. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.059.

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1\*</sup>, О. В. БЕРЛОВ<sup>2\*</sup>, О. В. ШЕВЧЕНКО<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Каф. «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос». Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, вул. Казакова, 18, корп. № 14, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 760 92 07, ел. пошта berlov@bigmir.net, ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>3\*</sup>Головне управління ДСНС України у Дніпропетровській області, вул. Короленко, 4, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (056) 744 25 87, ел. пошта dnipro@fireman.dp.ua, ORCID 0000-0001-9907-3610

## МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ПРИ НАДЗВИЧАЙНІЙ СИТУАЦІЇ В СХОВИЩІ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ПАЛИВА

**Мета.** Розробка прикладної чисельної моделі для розрахунку динаміки забруднення атмосфери над містом при надзвичайній ситуації в сховищі твердого ракетного палива, що супроводжується викидом в атмосферу продуктів горіння. **Методика.** Для чисельного моделювання процесу перенесення небезпечної речовини (продукту горіння твердого ракетного палива) в атмосфері застосовується рівняння конвективно-дифузійного перенесення домішки. Це рівняння враховує розсіювання в атмосфері небезпечної речовини за рахунок вітру та атмосферної дифузії. Для розрахунку процесу забруднення повітряного середовища усередині приміщень при затіканні в них забрудненого атмосферного повітря використовується балансова модель. Ця модель враховує величину повітрообміну в приміщенні, об'єм приміщення та концентрацію небезпечної речовини в потоці, що входить в приміщення. Величина повітря, що фільтрується, в приміщенні розраховується за допомогою емпіричної моделі. Для чисельного інтегрування рівняння перенесення домішки в атмосфері застосовується неявна різницева схема. На основі побудованої чисельної моделі створений код на алгоритмічній мові Фортран. Проведено обчислювальний експеримент із оцінки рівня забруднення атмосфери над м. Павлоградом і повітряного середовища усередині приміщень. **Результати.** Запропонована модель дозволяє оперативно розрахувати забруднення атмосфери при викиді хімічно небезпечної речовини. Модель дозволяє визначити розміри зони токсичного ураження людей. За допомогою розробленої чисельної моделі виконана оцінка ризику ураження людей в селітебній зоні м. Павлоград. **Наукова новизна.** Створена чисельна модель, що дозволила оперативно оцінити ризик токсичного ураження людей м. Павлоград у разі надзвичайної ситуації в сховищі твердого ракетного палива. **Практична значимість.** Розроблена чисельна модель може бути використана для оцінки ризику ураження людей на відкритому повітрі або усередині приміщень при емісії хімічно небезпечних речовин в атмосферу. За допомогою розробленої чисельної моделі вирішено завдання з оцінки наслідків для населення при займанні твердого ракетного палива у сховищі.

**Ключові слова:** забруднення атмосфери; ракетне паливо; інфільтрація небезпечних речовин в приміщенні; чисельне моделювання

М. М. BILIAIEV<sup>1\*</sup>, A. V. BERLOV<sup>2\*</sup>, A. V. SHEVCHENKO<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Dep. «Aerohydrodynamics and Masstransfer», Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Kazakova St., 18, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 760 92 07, e-mail berlov@bigmir.net, ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>3\*</sup>Main Administration of Ministry of Emergencies of Ukraine in the Dnepropetrovsk region, Korolenko St., 4, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 744 25 87, e-mail dnipro@fireman.dp.ua, ORCID 0000-0001-9907-3610

## SIMULATION OF THE ACCIDENTAL POLLUTION AFTER THE EMERGENCY IN TO THE STORAGE OF ROCKET SOLID PROPELLANT

**Purpose.** Development of the operational numerical model to compute contamination of the atmosphere over Pavlograd city in the case of solid rocket propellant ignition at the storage. **Methodology.** To simulate the toxic

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

chemical dispersion (product of the solid rocket propellant firing) the equation of convective-diffusion transfer is used. This equation takes into account the toxic chemical dispersion in the atmosphere by wind and the atmosphere diffusion. To calculate the process of the indoor contamination in the case of the contaminated air infiltration a balance model is used. This model takes into account the ventilation flow rate, volume of the room, concentration of toxic chemical in the inlet air. To compute the ventilation flow rate the empirical model was used. The implicit change–triangle difference scheme was used for the numerical integration of the governing equation. FORTRAN language was used to develop code on the basis of the created numerical model. On the basis of the developed numeral model numerical experiment was carried out which allowed to estimate the level of atmosphere contamination in Pavlograd city. **Findings.** The operational model allows predicting quickly the hitting zone dimensions. The developed model was used to estimate risk of people toxic hitting in the residential districts of Pavlograd city. **Originality.** A numeral model allows to estimate the risk of toxic hitting of people in Pavlograd city in the case of an accident at the of solid rocket propellant storage. **Practical value.** The developed numeral model can be used for the quick estimation of risk for people in the city after toxic chemical release at the solid propellant storage. The developed numerical model solves the problem to assess the consequences for the population at ignition of solid rocket propellant in storage.

*Keywords:* contamination of atmosphere; rocket propellant; infiltration of toxic chemical into the apartment; numeral simulation

## REFERENCES

1. Kotlyarevskiy V.A., Zabegayev A. V. *Avariya i katastrofy. Preduprezhdeniye i likvidatsiya posledstviy*. V 5-ti knigakh [Accident and disasters. Warning and liquidation of consequences. Five books]. Moscow, ACB Publ., 2001.
2. Belyayev N.N., Gunko Ye.Yu., Mashykhina P.B. *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachah ekologicheskoi bezopasnosti i monitoringa chrezvychaynykh situatsiy* [A mathematical modeling in the tasks of ecological safety and monitoring of emergencies]. Dnipropetrovsk, Aktsent PP Publ., 2013. 159 p.
3. Belyayev N.N., Berlov A.V. Prognozirovaniye zagryazneniya prizemnogo sloya atmosfery pri gorenii tverdogo raketnogo topliva v khranilishche [Prediction of ground-level air pollution at burning of solid rocket propellant in storage]. *Zbirnyk naukovykh prats NGU* [Proc. of NMU], 2013, no. 42, pp. 160-167.
4. Berlov A.V. Raschet zagryazneniya prizemnogo sloya atmosfery pri gorenii tverdogo raketnogo topliva [Calculation of ground-level air pollution at burning of solid rocket propellant]. *Zbirnyk naukovykh prats «Naukovyi visnyk budivnytstva»* [Proc. «Scientific Bulletin of construction»], Kharkiv, 2014, issue 1 (75), pp. 185-189.
5. Berlyand M.Ye. *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery* [Prognosis and controlling of atmosphere pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 273 p.
6. Gusev N.G., Belyayev V.A. *Radioaktivnyye vybrosy v biosfere* [Radioactive emissions in biosphere]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 257 p.
7. Izrayel Yu.A. *Ekologiya i kontrol sostoyaniya prirodnoy sredy* [Ecology and control of the natural environment state]. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 560 p.
8. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in the environmental problem]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p.
9. Mashikhina P.B. Modelirovaniye rasprostraneniya primesi v atmosfere s uchetom relyefa mestnosti [Simulation of impurity spread in the atmosphere in view of the terrain]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 27, pp. 138-142.
10. Rusakova T.I. Prognozirovaniye zagryazneniya vozdushnoy sredy ot avtotransporta na ulitsakh i v mikrorayonakh goroda [Prediction of air pollution from motor transport in city streets and districts]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 6 (48), pp. 32-44.
11. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 616 p.
12. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K., Belyaev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modeling of pollution spread in the environment]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1997. 368 p.
13. Elterman V.M. *Ventilyatsiya khimicheskikh proizvodstv* [Ventilation of chemical productions]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 288 p.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

---

14. Biliaiev M.M., Kharytonov M.M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and it's Application XXI*, NATO SPS Series C: Environmental Security Springer, 2012, pp.87-91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15.
15. Chan W.R., Nazaroff W.W., Price P.N., Gadgil A.J. Effectiveness of Urban Shelter-in-Place II: Residential Districts. *Atmospheric Environment*, 2007, issue 41, pp. 4962–4976. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.059.

*Статья рекомендована к публикации д.физ.-мат.н., проф. В. Д. Пичуговым (Украина); д.физ.-мат.н., проф. О. Г. Гоманом (Украина)*

Надійшла до редколегії: 20.06.2014

Прийнята до друку: 20.09.2014