

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», gidravlika2013@mail.ru

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

З. Н. ЯКУБОВСКАЯ – к. т. н., доцент, Украинский государственный химико-технологический университет, кафедра «Физика»

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЛОКАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ АВАРИЙНОМ ВЫБРОСЕ ОПАСНОГО ВЕЩЕСТВА

Статью представил приват-проф. Л. Ф. Долина

Постановка проблемы

К числу наиболее опасных источников возможного химического загрязнения окружающей среды относится Павлоградский химический завод, где в специальных хранилищах размещено твердое ракетное топливо (ТРТ) ракетной системы РС-22 (рис. 1). Твердое топливо находится внутри специально оборудованных хранилищ, возле которых располагается защитный вал (рис. 2). Этот вал обеспечивает определенную защитную функцию в случае чрезвычайной ситуации в хранилище. Поэтому при моделировании локального загрязнения атмосферы, вблизи хранилища необходимо при прогнозе учесть этот вал, истечение струи продуктов сгорания из здания и, по существу, процесс гидродинамического взаимодействия этой струи с ветровым потоком. Для практики важно иметь численную модель, позволяющую учесть эти особенности.

Анализ последних исследований и публикаций

В Украине оценка последствий аварийных выбросов на химически опасных объектах и транспорте осуществляется с по-

мощью нормативной методики, методики ОНД-86 или методики РД 52.04.253-90 [8].



Рис. 1. Вид снаряженного ракетного твердотопливного двигателя РС-22

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 [6]. Данные модели позволяют оперативно рассчитать зону загрязнения, но для упрощенных ситуаций типа точечный постоянно действующий источник выброса или точечный мгновенный выброс [6].



Рис. 2. Общий вид зоны размещения хранилищ твердого ракетного топлива:

1 – хранилище твердого ракетного топлива,
2 – защитный вал

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, 2-5, 7, 11, 12].

Цель

Целью данной работы является разработка CFD (Computational Fluid Dynamics) модели для прогноза загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива в хранилище. Основное требование к данной модели – учет основных физических факторов при моделировании и малые затраты компьютерного времени при практической реализации модели.

Методика

При расчете процесса загрязнения атмосферы, в масштабе «microscale» в случае аварийной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива (рис.2) решение задачи разбивается на два шага. На первом шаге решается задача по определению поля скорости воздушного потока с учетом взаимодействия выходящего из хранилища 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; ψ – функция тока; ν – 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 [8].

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, 9, 11, 12]

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

где C – концентрация загрязняющего вещества; u, v – компоненты вектора скорости

сти 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; σ – коэффициент, учитывающий химический распад загрязнителя; t – время.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [1, 11].

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

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

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 здания – хранилища твердого ракетного топлива, форма и местоположение защитного вала возле хранилища.

Численное интегрирование моделирующих уравнений

Для численного интегрирования уравнений Навье – Стокса используются неявные разностные схемы [1,10]. Для численного интегрирования уравнения переноса примеси используется попеременно - треугольная неявная разностная схема расщепления [1,11].

Алгоритм решения

Построенная численная модель относится к классу «diagnostic models». Это модели, которые учитывают основные физиче-

ские факторы, влияющие на развитие чрезвычайной ситуации, но требуют небольших затрат компьютерного времени при практической реализации на компьютерах малой и средней мощности (время расчета порядка нескольких минут). Назначение таких моделей – быстрый серийный расчет разнообразных сценариев чрезвычайной ситуации и диагностика интенсивности загрязнения окружающей среды. Модели данного класса обеспечивают оперативное определение зон загрязнения и социального риска для моделирующей чрезвычайной ситуации.

Разработанная в данной работе 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. Разработанная модель ориентирована на решение следующей задачи. Рассматривается здание – хранилище твердого ракетного топлива РС-22. Возле здания размещается защитный вал (см. рис.2). Ставится задача по оценке уровня загрязнения приземного слоя атмосферы при чрезвычайной ситуации в хранилище, когда произойдет возгорание топлива внутри хранилища и струя газа – продуктов горения будет выходить из хранилища наружу, приводя к загрязнению воздушной среды.

Пакет программ включает в себя следующие подпрограммы:

1. ТВ2 – численный расчет рассеивания опасного вещества в атмосфере на первом шаге расщепления;
2. ТВ3 – 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. Это следующие данные:
 - размеры расчетной области;
 - координаты расположения источника эмиссии опасного вещества;
 - время в течении которого происходит эмиссия опасного вещества;
 - интенсивность эмиссии тепла при горении TPT;
 - скорость и направление ветра;
 - положение рецептора;
 - форма здания (хранилища с TPT);
 - форма защитного вала.

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

Функциональные особенности пакета программ «WALL-2»:

1. Возможность учета различных классов стабильности атмосферы.

2. Возможность учета истечения струи продуктов горения ракетного топлива из здания хранилища и взаимодействия этой струи с защитным валом (экраном).

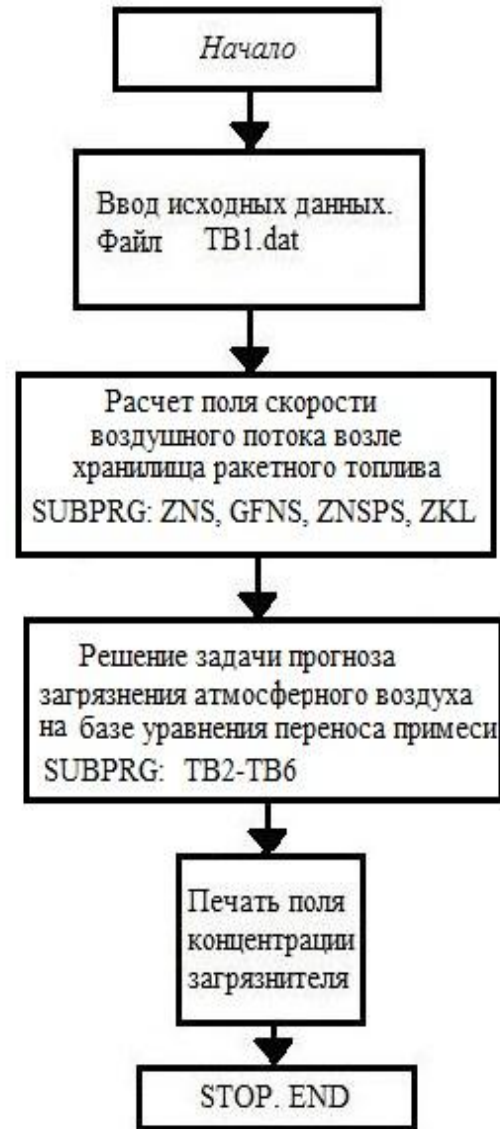


Рис. 3. Основные этапы алгоритма решения задачи с помощью пакета программ «WALL-2»

3. Возможность учета распространения опасного вещества внутри здания хранилища.

4. Возможность учета вымывания примеси осадками.

5. Учет неравномерного по высоте профиля скорости ветра.

6. Быстрота расчета (5 минут).

Практическая реализация численной модели

Расчет выполнялся при следующих исходных данных: значение скорости ветра на фиксированной высоте Y_1 равна 5 м/с. Размеры расчетной области 41.6 м x 42 м; высота вала – 12 м; высота хранилища – 12 м; $\sigma = 0$.



Рис. 4. Хранилище твердого ракетного топлива:

1 – здание хранилища; 2 – защитный вал

Внутри хранилища (рис.4) располагается горящий корпус ракетного двигателя РС-22 из которого выходит струя газа, содержащая продукты горения. Этот процесс моделируется следующим образом. Внутри здания задается разностная ячейка, из которой выходит поток со скоростью V_{gas} , содержащий загрязнитель (Al_2O_3) с концентрацией 100 ед. (в безразмерном виде). Скорость струи выходящего из хранилища газового потока – продуктов сгорания принята равной $V_{gas} = 20 \text{ м/с}$. Расчет переноса загрязнителя осуществляется как внутри здания, так и снаружи.

Скорость переноса загрязнителя внутри здания определяется скоростью газового потока V_{gas} и диффузией, а снаружи здания – скоростью переноса, которая формирует-

ся в процессе взаимодействия выходящего из здания газового потока и ветрового потока плюс атмосферная диффузия. Коэффициенты диффузии по обоим направлениям внутри здания рассчитываются по зависимости $\mu \approx k \cdot u$, где $u = V_{gas}$ – скорость газового потока, $k = 0.1$, $Re = 15.89 \cdot 10^6$. При расчете числа Рейнольдса в качестве масштабов выбиралось скорость газового потока, высота здания и кинематический коэффициент вязкости при температуре 20°C.

Результаты

На последующих рисунках показана зона загрязнения возле хранилища для трех различных сценариев:

1. При наличии защитного вала (рис. 5, 6).
2. При наличии частично разрушенного вала (рис.7).
3. При наличии экрана, установленного на валу (рис.8).

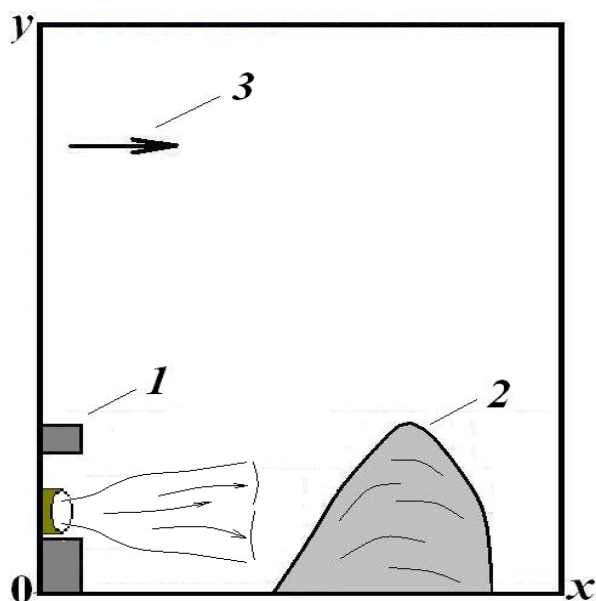


Рис. 5. Схема расчетной области:

1 – хранилище твердого ракетного топлива; 2 – защитный вал; 3 – направление ветра

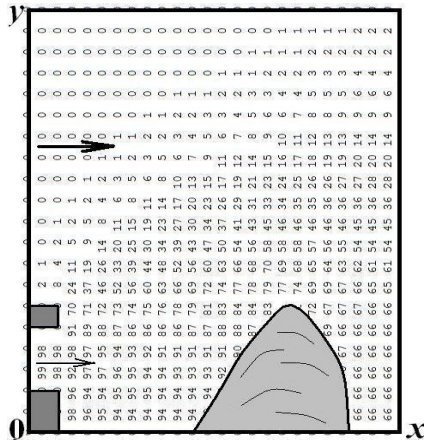


Рис. 6. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени $t=48$ с (скорость ветра на высоте Y_1 равна 5м/с)

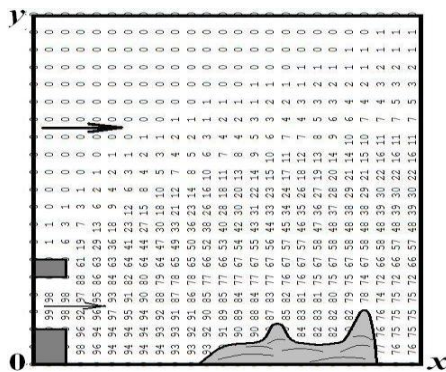


Рис. 7. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени $t=48$ с (разрушенный защитный вал, скорость ветра на высоте Y_1 равна 5м/с)

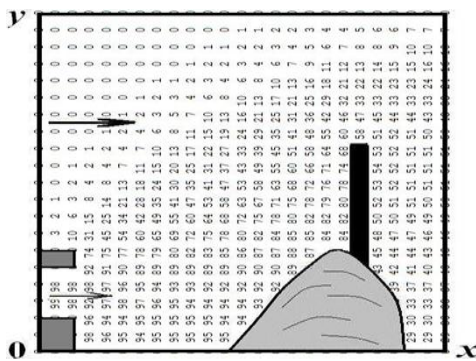


Рис. 8. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени $t=48$ с

Как видно из представленных рисунков концентрация опасного вещества (Al_2O_3) за валом в первом случае составляет 66% от

концентрации внутри хранилища, во втором случае – 76 %, в третьем – 33 %. Т.е. совершенно очевидно, что вал играет определенную защитную функцию, и эффективность защиты может быть повышена при установке экрана на существующем валу.

Проверка адекватности модели аэродинамики.

Для проверки адекватности численной модели, основанной на уравнениях движения Навье-Стокса, был проведен физический эксперимент по измерению скорости потока в аэродинамической трубе. Эксперимент проводился в аэродинамической трубе Т5, которая находится в лаборатории аэродинамики Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара. Вид трубы приведен на рис.9.

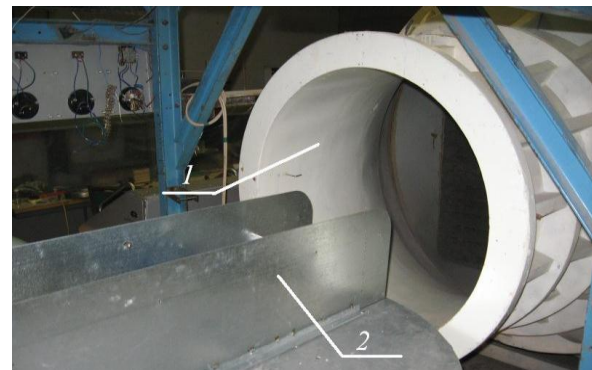


Рис. 9. Вид рабочей части аэродинамической трубы Т5: 1 – аэродинамическая труба; 2 – ограничительные шайбы (лаборатория аэродинамики Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара)

Схема экспериментальной установки приведена на рис.10.

Размещение моделей в рабочей части трубы показано на рис. 11. Рабочая часть аэродинамической трубы Т5 выполнена открытой. Длина рабочей части равна 1115 мм, диаметр выходного сечения сопла $D = 750$ мм. Скорость потока измерялась с

помощью трубки Пито $d = 8$ мм, давление 745 мм. рт. ст., температура воздуха 22 °С.

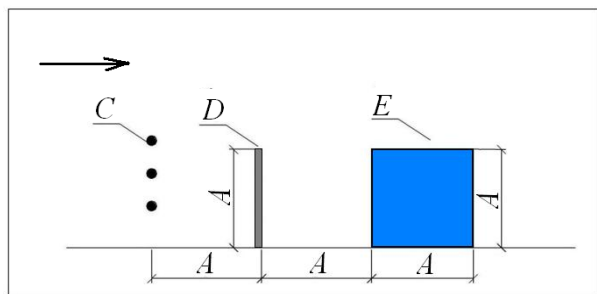


Рис. 10. Схема моделируемой области: D – пластина; E – модель здания; C – точки измерения ($A=100$ мм)

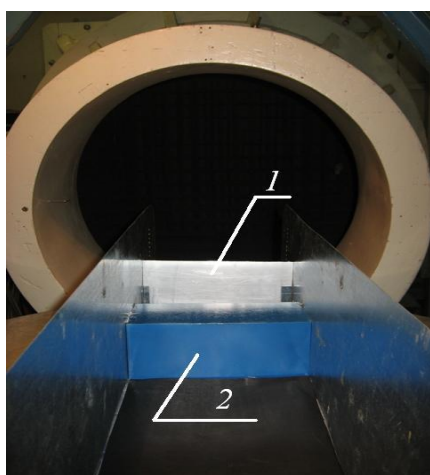


Рис. 11. Размещение моделей в аэродинамической трубе: 1 – пластина; 2 – модель здания

При проведении эксперимента проводилось измерение скорости перед пластиной (см. рис.10). Результаты сравнения измеренных значений скорости и расчета скорости по разработанной численной модели показаны в табл. 1.

Таблица 1

Скорость воздушного потока перед пластиной

Высота от основания	Расчет	Эксперимент
10 мм	11.38 м/с	11.43 – 11.55 м/с
30 мм	11.66 м/с	11.71 – 11.79 м/с
50 мм	12.23 м/с	12.37 – 12.46 м/с
70 мм	13.05 м/с	13.11 – 13.16 м/с
90 мм	14.07 м/с	14.13 – 14.26 м/с

Как видно из представленных данных наблюдается удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных. К сожалению, в виду отсутствия оборудования для точечного измерения концентрации примеси, не было возможности для проведения эксперимента по моделированию рассеивания примеси в условиях застройки в аэродинамической трубе.

Выводы

Рассмотрена эффективная численная модель (diagnostic model) для экспресс расчета уровня загрязнения атмосферы при аварийной ситуации в хранилище ТРТ. 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 в хранилище с ТРТ. Проведено сравнение расчетов по разработанной модели с данными эксперимента. Дальнейшее совершенствование модели следует проводить в направлении ее развития для расчета 3-D переноса примеси в атмосфере.

Бibliографический список

1. Антошкина, Л. И. Моделирование аварийных ситуаций на промышленных объектах и безопасность жизнедеятельности [Текст] / Л. И. Антошкина, Н. Н. Беляев, Л. Ф. Долина, Е. Д. Коренюк. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2011. – 123 с.
2. Беляев, Н. Н. Моделирование процесса загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива [Текст] / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія «Механіка». – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 17, т. 1. – С. 179-184.
3. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование прогрева корпуса первой ступени ракеты РС-22 при инициирован-

- ном воздействию [Текст] / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, А. И. Губин // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2012. – № 38. – С. 192-201.
4. Беляев, Н. Н. Численное моделирования загрязнения воздушной среды на промышленных площадках [Текст] / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 16. – Дніпропетровськ, 2007. – С. 18-20.
 5. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование в задачах экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций: Монография.[Текст] / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина. – Днепропетровск: «Акцент ПП», 2013. – 159 с.
 6. Бруцкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов [Текст] / Е. В. Бруцкий. – Киев: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
 7. Згуровский, М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев: Наукова думка, 1997. – 368 с.
 8. Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті [Текст]: – Київ, 2001. – 33 с.
 9. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г. И. Марчук. – Москва: Наука, 1982. – 320 с.
 10. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – Москва: Наука, 1983. – 616 с.
 11. Belyaev, M. Air Pollution Modelling of Technogenic Catastrophes caused by Terrorist Attacks on Rail Transport of Chemical Substances [Text] / M. Belyaev // Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment. NATO Science for Peace and Security Series. – C.: Environmental Security, Springer, 2007. – P. 327-336.
 12. Biliaiev, M. M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography [Text] / 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.
- Ключові слова:** забруднення атмосфери, чисельне моделювання, надзвичайні ситуації
- Ключевые слова:** загрязнение атмосферы, численное моделирование, чрезвычайные ситуации
- Keywords:** contamination of atmosphere, numeral modeling, emergencies

Поступила в редколлегию 02.01.2014