

УДК 519.6

## ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ ЭМИССИИ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

БЕЛЯЕВ Н. Н.<sup>1\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
МУНТЯН Л. Я.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кафедра «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38(056) 373-15-09, e-mail: [gidravlika2013@mail.ru](mailto:gidravlika2013@mail.ru), ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2</sup> Кафедра «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38(056) 373-15-09, e-mail: [lili.muntyan@mail.ru](mailto:lili.muntyan@mail.ru), ORCID 0000-0002-1659-7740

**Аннотация.** *Цель.* Разработка численных моделей для прогноза загрязнения атмосферы при эмиссии химически опасных веществ на железнодорожном транспорте в случае аварийных ситуаций. *Методика.* Для решения поставленной задачи разработаны численные модели, основанные на применении уравнений массопереноса и потенциального течения. Уравнения для потенциального течения используются для определения поля скорости ветрового потока вблизи вагонов и зданий. Для численного интегрирования уравнения массопереноса загрязнителя использовалась неявная попеременно-треугольная разностная схема. При построении разностной схемы осуществляется физическое и геометрическое расщепление уравнения переноса на четыре шага. Незвестное значение концентрации загрязнителя на каждом шаге расщепления определяется по явной схеме – методу бегущего счета. Для численного интегрирования уравнения для потенциального течения применяется неявная разностная схема условной аппроксимации. На основе построенных численных моделей проведен вычислительный эксперимент по оценке уровня загрязнения атмосферы в случае эмиссии химически опасного вещества на примагистральной территории. *Результаты.* Разработаны численные модели, которые относятся к классу «operational models». Эти численные модели позволяют учесть при проведении вычислительного эксперимента основные физические процессы, влияющие на рассеивание химически опасных веществ в атмосфере с учетом размещения различного рода препятствий возле очага эмиссии. Построенные модели требуют небольших затрат компьютерного времени при практической реализации на компьютерах малой и средней мощности. Данные численные модели могут применяться при разработке ПЛАСа, когда проводятся серийные расчеты различных сценариев аварийных ситуаций на транспорте. Представлены результаты вычислительного эксперимента по оценке размеров, формы, концентрации химически опасного вещества в случае эмиссии на железной дороге. *Научная новизна.* Разработаны эффективные численные модели, позволяющие в режиме реального времени моделировать аварийные ситуации, сопровождающиеся эмиссией опасных веществ на транспорте. *Практическая значимость.* Разработаны численные модели типа «operational models», для определения размеров и интенсивности зон химического заражения при аварийных ситуациях в случае перевозки железнодорожным транспортом химически опасных веществ. Разработанные численные модели используют стандартную метеорологическую информацию и не требуют специальной подготовки у пользователя.

**Ключевые слова:** защита атмосферы; перевозка опасных грузов; численное моделирование

## ЗАХИСТ АТМОСФЕРИ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ ПРИ ЕМІСІЇ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

БІЛЯЄВ М. М.<sup>1\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
МУНТЯН Л. Я.<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, , e-mail: [gidravlika2013@mail.ru](mailto:gidravlika2013@mail.ru), ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2</sup> Кафедра «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, , e-mail: [lili.muntyan@mail.ru](mailto:lili.muntyan@mail.ru), ORCID 0000-0002-1659-7740

**Анотація.** *Мета.* Розробка чисельних моделей для прогнозу забруднення атмосфери при емісії хімічно небезпечних речовин на залізничному транспорті в разі аварійних ситуацій. *Методика.* Для вирішення поставленого завдання розроблені чисельні моделі, засновані на застосуванні рівнянь масопереносу і потенційної течії. Рівняння для потенційної течії використовуються для визначення поля швидкості вітрового потоку поблизу вагонів і будівель. Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу забруднювача використовувалася неявна попеременно-трикутна різницева схема. При побудові різницевої схеми здійснюється фізичне і геометричне розщеплення рівняння переносу на чотири кроки. Невідоме значення концентрації забруднювача на кожному кроці розщеплення визначається за явною схемою – методу біжучого рахунку. Для чисельного інтегрування рівняння для потенційної течії застосовується неявна різницева схема умовної

апроксимації. На основі побудованих чисельних моделей проведено обчислювальний експеримент з оцінки рівня забруднення атмосфери у разі емісії хімічно небезпечної речовини на примагістральній території. **Результати.** Розроблено чисельні моделі, які відносяться до класу «operational models». Ці чисельні моделі дозволяють врахувати при проведенні обчислювального експерименту основні фізичні процеси, що впливають на розсіювання хімічно небезпечних речовин в атмосфері з урахуванням розміщення різного роду перешкод біля джерела емісії. Побудовані моделі вимагають невеликих витрат комп'ютерного часу при практичній реалізації на комп'ютерах малої та середньої потужності. Дані чисельні моделі можуть застосовуватися при розробці ПЛАСа, коли проводяться серійні розрахунки різних сценаріїв аварійних ситуацій на транспорті. Представлені результати обчислювального експерименту з оцінки розмірів, форми, концентрації хімічно небезпечної речовини у разі емісії на залізниці. **Наукова новизна.** Розроблено ефективні чисельні моделі, що дозволяють в режимі реального часу моделювати аварійні ситуації, що супроводжуються емісією небезпечних речовин на транспорті. **Практична значимість.** Розроблено чисельні моделі типу «operational models» для визначення розмірів та інтенсивності зон хімічного ураження при аварійних ситуаціях у разі перевезення залізничним транспортом хімічно небезпечних речовин. Розроблені чисельні моделі використовують стандартну метеорологічну інформацію і не вимагають спеціальної підготовки у користувача.

**Ключові слова:** захист атмосфери; перевезення небезпечних вантажів; чисельне моделювання

## PROTECTION OF THE ATMOSPHERE FROM POLLUTION IN THE EMISSION OF HAZARDOUS SUBSTANCES IN RAILWAY TRANSPORT

BILIAIEV M. M.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*  
MUNTYAN L. Y.<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Department of «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryan St., Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail [gidravlika2013@mail.ru](mailto:gidravlika2013@mail.ru), ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2</sup> Department of «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryan St., Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail [lili.muntyan@mail.ru](mailto:lili.muntyan@mail.ru), ORCID 0000-0002-1659-7740

**Abstract. Purpose.** The development of numerical models for the prediction of air pollution in the emission of chemical hazardous substances in rail transport in the case of emergencies. **Methodology.** To solve this problem developed numerical models based on the use of the equations of mass transfer and potential flow. The equations for potential flow are used to determine the velocity field of the wind flow near the carriages and buildings. For the numerical simulations of mass transfer of the pollutant used implicit change triangle difference schemes. When constructing a difference scheme is carried out physical and geometric splitting of the transport equation in the four steps. For the numerical integration of the equation for potential flow of implicit difference scheme is used conditional approximation. **Findings.** The numerical models that belong to the class «operational models». These numerical models allow to take into account in conducting the computational experiment the basic physical processes that affect dispersion of hazardous chemical substances in the atmosphere taking into account the placement of various types of obstacles near place of emission. These numerical models can be applied in the development of the PLAS, when carried out serial calculations of various scenarios of emergencies in transport. The results of computational experiments to assess the size, shape, concentration of chemical substances in the case of dangerous emissions on the railroad. **Originality.** The effective numerical models for real-time simulated emergencies, accompanied by the emission of hazardous substances in transport. **Practical value.** A numerical model of the type of «operational models» to determine the size and intensity zones of chemical contamination in emergency situations in the case of transport by rail chemically hazardous substances. A numerical model using standard meteorological information and do not require special training of the user.

**Keywords:** protection of the atmosphere; transport of dangerous cargo; numerical modeling

### Введение

Аварии на железнодорожном транспорте при перевозке химически опасных грузов приводят к интенсивной эмиссии различных токсичных веществ в атмосферу (рис. 1). Поэтому к числу актуальных задач относятся задачи прогнозирования масштаба загрязнения при таких авариях и организация эффективной защиты окружающей среды от загрязнения. Одним из эффективных методов защиты атмосферы от загрязнения является применение нейтрализаторов, которые подаются с вертолета для локализации и ликвидации зон загрязнения. Но для

практики крайне важно иметь методики расчета для оценки эффективности этого метода защиты и его оптимизации, применительно к каждой конкретной ситуации.



Рис. 1. Авария на железнодорожном транспорте /  
Accident on railway transport

В настоящее время для прогноза уровня загрязнения атмосферы в случае аварий на железнодорожном транспорте применяется нормативная методика или методика ОНД-86 [4]. Данные методики являются эмпирическими и не учитывают ряд физических факторов: профиль ветра, атмосферную диффузию. В ряде случаев применяется модель Гаусса [4]. Модель Гаусса относится к аналитическим моделям и не учитывает ряд важных физических факторов [2]. Данную модель нельзя применять для расчета процесса нейтрализации опасного вещества в атмосфере. Значительно большими возможностями обладают численные модели [1-3, 8, 9].

### Цель

Целью данной работы является разработка численной модели для прогноза загрязнения атмосферы при аварийных выбросах на железнодорожном транспорте и оценки эффективности защиты атмосферы от загрязнения путем подачи нейтрализатора.

### Методика

Для решения этой задачи применяются уравнения Навье-Стокса, записанные в переменных Гельмгольца: Для моделирования процесса рассеивания опасных веществ в атмосфере и для моделирования процесса их нейтрализации используется уравнение переноса примеси [1-3, 5, 7]:

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

где  $C$  – концентрация опасного вещества (нейтрализатора);  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий химический распад загрязнителя;  $u, v$  – компоненты вектора скорости воздушного потока;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии;  $Q$  – интенсивность выброса опасного вещества (нейтрализатора);  $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$  – дельта-функция Дирака;  $x_i, y_i$  – координаты источника эмиссии;  $t$  – время.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работе [1]. Для моделирования аэродинамики воздушных потоков при обтекании вагонов, цистерн на дороге используется модель идеальной жидкости. Поскольку нейтрализатор поступает от вертолета в зону загрязнения с определенной скоростью, то в модели учитывается этот процесс. Аэродинамическая задача решается на базе уравнения [7]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (2)$$

где  $P$  – потенциал скорости.

Таким образом, на базе уравнения (2) моделируется поле ветрового потока с учетом обтекания препятствий и впрыска нейтрализатора с определенной скоростью в атмосферу. Численное интегрирование уравнения (2) проводится с помощью метода условной аппроксимации [6]. Уравнение для потенциала скорости записывается в эволюционном виде с последующим расщеплением на два дробных шага. Разностные уравнения на каждом дробном шаге имеют вид:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[ \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[ \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Значение потенциала скорости, на каждом шаге расщепления, рассчитывается по формулам:

$$P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = P_{i,j}^n + \Delta t \cdot \left[ \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \Delta t \cdot \left[ \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Рассмотрим аппроксимацию производных, входящих в уравнение массопереноса. Производную за временем аппроксимируем разделенной разностью

$$\text{«назад»}: \frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

Конвективные производные запишем в виде:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}; \quad \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y};$$

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}; \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}; \quad v^+ = \frac{v + |v|}{2}; \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

Аппроксимируем конвективные производные разделенными разностями «против потока» на верхнем временном слое следующим образом:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}, \text{ и т.д.}$$

Для аппроксимации вторых производных используются такие зависимости:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} =$$

$$= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1} \text{ и т.д.}$$

В данных зависимостях  $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-$ ,  $M_{xx}^+, M_{xx}^-, M_{yy}^+, M_{yy}^-$  – условные обозначения разностных операторов. Используя эти обозначения, запишем разностную аппроксимацию уравнения переноса при его расщеплении на ряд шагов:

на первом шаге расщепления  $k = \frac{1}{4}$  :

$$\frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4}(M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{q_l}{4} ;$$

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

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{q_l}{4} \delta_l ;$$

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

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{q_l}{4} \delta_l ;$$

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

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{q_l}{4} \delta_l .$$

Расчёт неизвестного значения концентрации  $C$  на каждом дробном шаге рассмотренной разностной схемы, осуществляется по явной формуле бегущего счёта.

На базе разработанной численной модели разработан пакет программ на языке FORTRAN.

### Результаты

Разработанная численная модель относится к классу «operational models». Данная модель позволяет оперативно оценивать эффективность процесса защиты атмосферы от загрязнения при подаче нейтрализатора от вертолета.

Ниже (рис.2) показаны результаты применения построенной численной модели. Здесь показана концентрация опасного вещества при подаче нейтрализатора в зону загрязнения, образовавшуюся

при эмиссии HCN от зоны разлива возле первой цистерны. Рядом с ней расположены вагоны. Происходит движение вертолета, подающего нейтрализатор.

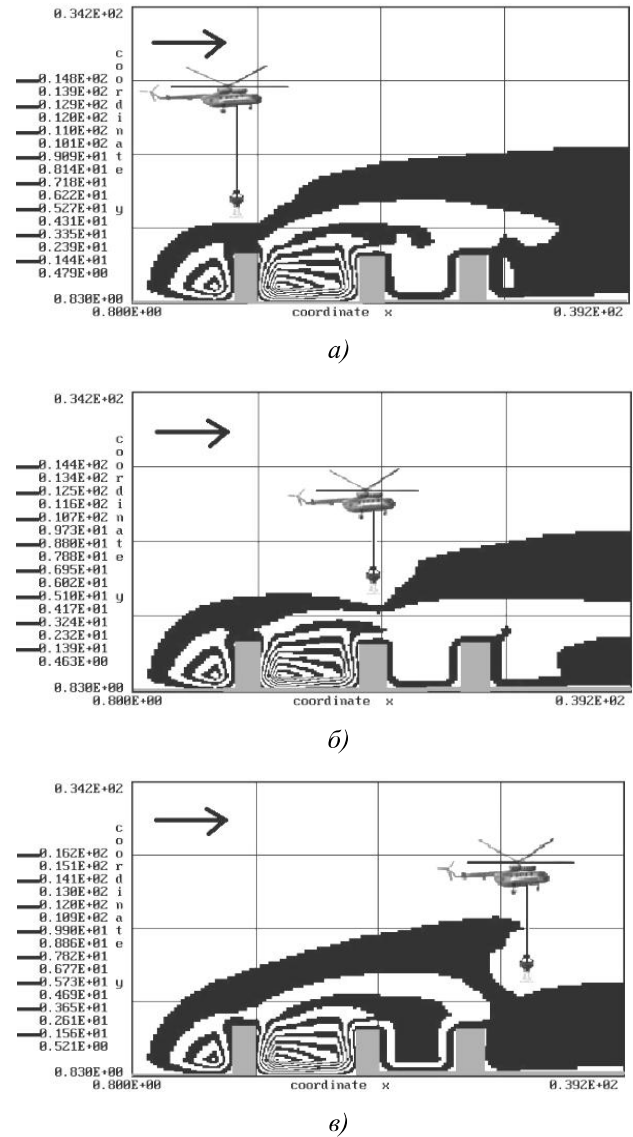


Рис.2. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени (а –  $t=1$  с, б –  $t=4$  с, в –  $t=30$  с) / Contamination area of the atmosphere for time (а –  $t=1$  s, б –  $t=4$  s, в –  $t=30$  s)

Как видно из представленных рисунков, в случае аварии формируется сложная картина распределения концентрации опасного вещества на магистральной территории. Между вагонами образуются застойные зоны. Подача нейтрализатора локально изменяет концентрацию загрязнителя в атмосфере. Это хорошо видно из рис. 2 – на месте подачи нейтрализатора образуется «выемка», вследствие взаимодействия нейтрализатора с загрязнителем.

### Научная новизна и практическая значимость

Создана численная модель, для расчета рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере, и моделирования процесса нейтрализации опасного вещества в атмосфере. Модель основана на применении двухмерного уравнения переноса примеси и уравнения для потенциала скорости.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

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

Belyayev N.N., Berlov A.V., Mashykhina P.V. Modelirovanie nestatsionarnykh protsessov avariynogo zagryazneniya atmosfery [Modelling of non-stationary processes of emergency air pollution]. Dnipropetrovsk, Aktsent PP Publ., 2014. 127 p.

<http://.....>

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

Belyayev N.N., Lisnyak V.M. Zashchita atmosfery ot zagryazneniya pri migratsii toksichnykh veshchestv [Protection of the atmosphere from pollution migration of toxic substances]. Dnipropetrovsk, ООО Innovatsiya Publ., 2006. 150 p.

<http://.....>

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

Belyayev N.N., Gunko Ye.Yu., Mashykhina P.V. 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.

<http://.....>

8. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.

Berlyand M.Ye. Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery [Prognosis and controlling of atmosphere pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 273 p.

### Выводы

1. Рассмотрена эффективная численная модель типа «operational models» для экспресс расчета процесса нейтрализации опасного вещества в атмосфере при подаче нейтрализатора из вертолета.

2. Дальнейшее совершенствование модели следует проводить в направлении ее развития для расчета 3D моделирования процесса нейтрализации опасного вещества в атмосфере.

<http://.....>

9. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. / Марчук Г. И. – М.: Наука, 1982. – 320 с.

Marchuk G.I. Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy [Mathematical modeling in the environmental problem]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p.

<http://.....>

10. Самарский А. А. Теория разностных схем. / Самарский А. А. – М.: Наука, 1983. – 616 с.

Samarskiy A.A. Teoriya raznostnykh skhem [The theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 616 p.

<http://.....>

11. 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.

Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K., Belyayev N.N. Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede [Numerical modeling of pollution spread in the environment]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1997. 368 p.

<http://.....>

12. Belyaev M. Air Pollution Modelling of Technogenic Catastrophes caused by Terrorist Attacks on Rail Transport of Chemical Substances / 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.

<http://.....>

13. Biliaiev M. M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // Conference Abstracts of 31st NATO / SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application. – Torino, Italy, 2010. – № P1.7.

<http://.....>

Статья рекомендована к публикации д-ром.техн.наук, проф. С. З. Полищуком (Украина)

Статья поступила в редколлегию 07.09.2015