

УДК 519.6

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

БЕЛЯЕВ Н. Н.¹, *д.т.н, проф.*,
БЕРЛОВ А. В.^{2*}, *инженер*
КИРИЧЕНКО П. С.³, *к.т.н.*

¹ 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, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*} 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: berlov@bigmir.net, ORCID 0000-0002-7442-0548

³ 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, ORCID 0000-0002-0793-9593

Аннотация. *Цель.* Разработка численных моделей для прогноза загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива в железнодорожном вагоне, расположенном вблизи здания на примагистральной территории. *Методика.* Для решения поставленной задачи разработаны численные модели, основанные на применении уравнений Навье-Стокса, для определения поля скорости ветрового потока вблизи вагонов и зданий, и уравнении переноса примеси в атмосфере. Для численного интегрирования уравнения транспорта 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 уравнений Навье-Стокса применяются неявные разностные схемы. На основе построенных численных моделей проведен вычислительный эксперимент по оценке уровня загрязнения атмосферы при транспортировке железнодорожным транспортом опасного груза при диверсии на примагистральной территории. *Результаты.* Разработаны численные модели, которые относятся к классу «diagnostic models». Данные модели учитывают основные физические факторы, влияющие на развитие чрезвычайной ситуации, но при этом требуют небольших затрат компьютерного времени при практической реализации на компьютерах малой и средней мощности. Эти модели используются для серийных расчетов разнообразных сценариев чрезвычайных ситуаций и диагностики интенсивности загрязнения окружающей среды. Выполнены вычислительные расчеты по определению концентрации загрязнителя и формирования зоны загрязнения атмосферного воздуха в масштабах «microscale» и «local». *Научная новизна.* Созданы численные модели, позволяющие учесть существенные факторы, влияющие на процесс рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере, и формирование зоны загрязнения при чрезвычайных ситуациях на железнодорожном транспорте связанных с эмиссией химически опасных веществ. *Практическая значимость.* Рассмотрены эффективные численные модели «diagnostic models» для экспресс расчета уровня загрязнения атмосферы при аварийных ситуациях в случае перевозки железнодорожным транспортом твердого ракетного топлива. Модели могут быть применены при разработке ПЛАСа. Предложенные модели позволяют рассчитать 2D гидродинамику ветрового потока и процесс массопереноса опасных веществ в атмосфере.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы; железнодорожный транспорт; перевозка опасных грузов; численное моделирование

ОЦІНКА РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ПРИ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

БІЛЯЄВ М. М.¹, *д.т.н, проф.*,
БЕРЛОВ О. В.^{2*}, *інженер*,
КИРИЧЕНКО П. С.³, *к.т.н.*

¹ 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, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*} 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: berlov@bigmir.net, ORCID 0000-0002-7442-0548

³ 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, ORCID 0000-0002-0793-9593

Анотація. Мета. Розробка чисельних моделей для прогнозу забруднення атмосфери при горінні твердого ракетного палива в залізничному вагоні, розташованому поблизу будівлі на примагістральній території. **Методика.** Для вирішення поставленого завдання розроблені чисельні моделі, засновані на застосуванні рівнянь Нав'є-Стокса, для визначення поля швидкості вітрового потоку поблизу вагонів і будівель, і рівнянні переносу домішки в атмосфері. Для чисельного інтегрування рівняння транспорту 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 рівнянь Нав'є-Стокса застосовуються неявні різницеві схеми. На основі побудованих чисельних моделей проведено обчислювальний експеримент з оцінки рівня забруднення атмосфери при транспортуванні залізничним транспортом небезпечного вантажу при диверсії на примагістральній території. **Результати.** Розроблено чисельні моделі, які відносяться до класу «diagnostic models». Дані моделі враховують основні фізичні фактори, що впливають на розвиток надзвичайної ситуації, але при цьому вимагають невеликих витрат комп'ютерного часу при практичній реалізації на комп'ютерах малої та середньої потужності. Ці моделі використовуються для серійних розрахунків різноманітних сценаріїв надзвичайних ситуацій та діагностики інтенсивності забруднення навколишнього середовища. Виконані обчислювальні розрахунки по визначенню концентрації забруднювача і формування зони забруднення атмосферного повітря в масштабах «microscale» і «local». **Наукова новизна.** Створені чисельні моделі, що дозволяють врахувати істотні фактори, що впливають на процес розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері, і формування зони забруднення при надзвичайних ситуаціях на залізничному транспорті пов'язаних з емісією хімічно небезпечних речовин. **Практична значимість.** Розглянуто ефективні чисельні моделі «diagnostic models» для експрес розрахунку рівня забруднення атмосфери при аварійних ситуаціях у разі перевезення залізничним транспортом твердого ракетного палива. Моделі можуть бути застосовані при розробці ПЛАСа. Запропоновані моделі дозволяють розрахувати 2D гідродинаміку вітрового потоку і процес масопереносу небезпечних речовин в атмосфері.

Ключові слова: забруднення атмосфери; залізничний транспорт; перевезення небезпечних вантажів; чисельне моделювання

EVALUATION OF THE LEVEL OF AIR POLLUTION IN EMERGENCY SITUATION ON RAILWAY TRANSPORT

BILIAIEV M. M. ¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

BERLOV O. V. ^{2*}, *engineer*

KIRICHENKO P. S. ³, *Cand. Sc. (Tech.)*

¹ 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, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*} 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 berlov@bigmir.net, ORCID 0000-0002-7442-0548

³ 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, ORCID 0000-0002-0793-9593

Abstract. Purpose. The development of numerical models for the prediction of air pollution by burning solid propellant in a railway carriage, which is located near the building on railway territory. **Methodology.** For the numerical simulations of pollutant transport use implicit change triangle difference schemes. To solve this problem developed numerical models based on the use of Navier-Stokes equations, to determine the velocity field of the wind flow near the cars and buildings, transport equation impurities in the atmosphere. When constructing a difference scheme is carried out physical and geometric splitting of the transport equation in the four steps. Unknown value pollutant concentration at each step of cleavage is determined by the explicit scheme. **Findings.** Numerical models are used for production of various settlement scenarios emergency and diagnostic intensity of pollution. Computational calculations are made to determine the concentration of the pollutant and the formation of the zone of air pollution on a scale «microscale» and «local» **Originality.** Created numerical models to take into account relevant factors influencing the process of dispersion of pollutants in the atmosphere. **Practical value.** Efficiency of numerical models «diagnostic models» for the express calculation of the level of air pollution in emergency situations in the case of transport by rail of solid rocket propellant. Models can be used in the development of PLAS. The proposed model allows to calculate the hydrodynamics of the 2D wind flow and mass transfer process of hazardous substances in the atmosphere.

Keywords: air pollution; railway transport; transport of dangerous cargo; numerical modeling

Введение

К числу наиболее опасных источников возможного химического загрязнения окружающей среды при перевозке железнодорожным транспортом относятся ракетное топливо, и в частности, твердое ракетное топливо (ТРТ) ракетной системы РС-22, которое складировано на Павлоградском химическом заводе.



Рис. 1. Перевозка снаряженных корпусов твердотопливных ракетных двигателей РС-22 железнодорожным транспортом / Transportation of the equipped cases of solid propellant rocket engines RS-22 by railway transport

Перевозка таких грузов определяет весьма высокий потенциальный уровень рисков возникновения чрезвычайных транспортных происшествий (аварий, диверсий) последствия которых может быть катастрофичным. Известно, что к перевозке таких опасных грузов предъявляются очень строгие требования, но, не смотря на это, возможно возникновение аварии или диверсии при транспортировке. В связи с этим представляется актуальным расчет возможного загрязнения атмосферы при диверсии на железнодорожном транспорте при перевозке ТРТ (рис.1). В этом случае особо важно оценить риск токсичного поражения людей на примагистральной территории, где нередко располагаются здания.

В настоящее время для прогноза уровня загрязнения атмосферы в случае аварий на железнодорожном транспорте применяется нормативная методика или методика ОНД-86 или методика РД 52.04.253-90 [3]. Данные методики являются эмпирическими и не учитывают скорость ветра, атмосферную диффузию на процесс формирования зоны загрязнения. Кроме этих методик для решения задач данного класса также применяются различные аналитические модели и модель Гаусса [2]. Эти модели позволяют быстро рассчитать зону загрязнения, но только для упрощенных ситуаций типа точечный постоянно действующий источник выброса или точечный мгновенный выброс [2]. Кроме этого, 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, 4].

Цель

Целью данной работы является разработка численных моделей для прогноза загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива в железнодорожном вагоне, расположенном вблизи здания на примагистральной территории (территории химически опасного объекта). 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» (расстояние порядка 50 – 100м) в случае аварийной ситуации – возгорание в железнодорожном вагоне ТРТ, решение задачи разбивается на два шага. На первом шаге решается задача по определению поля скорости воздушного потока, с учетом взаимодействия выходящего из железнодорожного вагона газового потока с ветровым потоком. Для решения этой задачи применяются уравнения Навье-Стокса, записанные в переменных Гельмгольца:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \quad (2)$$

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 [1].

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, 4]:

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

где C – концентрация загрязняющего вещества; u, v – компоненты вектора скорости 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 работе [1].

В разработанной численной модели используются следующие зависимости для задания профиля ветра и вертикального коэффициента атмосферной диффузии [2]:

$$u = u_1 \left(\frac{y}{y_1} \right)^p, \quad \mu_y = k_1 \left(\frac{y}{y_1} \right)^m, \quad \mu_x = k_0 u, \quad (4)$$

где u_1 – скорость ветра на высоте y_1 (принимается $z_1=10\text{м}$); $k_1=0,2$; $k_0=0,1$; $p=0,16$; $z \approx 1$.

Численное интегрирование уравнений модели выполняется на прямоугольной разностной сетке. При формировании расчетной области используется метод маркирования [1]. С помощью маркеров задается, положение железнодорожного вагона, форма и местоположение здания вблизи места эмиссии загрязнителя. Рассмотренные уравнения составляют основу модели «microscale» прогноз.

Для расчета аварийного загрязнения атмосферы в масштабе «local» разработана численная модель, которая основана на применении трехмерного уравнения вида (3), где параметры профиля ветра и коэффициентов атмосферной диффузии определяются по указанным выше зависимостям (4). Следует отметить, что для трехмерного случая в зависимостях (4) вместо « y » используется « z ». Эта модель уровня «local» прогноз. При ее реализации гидродинамическая задача не решается, а расчет выполняется по заданным метеорологическим параметрам.

Численное интегрирование уравнений Навье – Стокса осуществляется с помощью неявных разностных схем [1]. Для численного интегрирования двухмерного и трехмерного уравнений переноса примеси используется попеременно-треугольная неявная разностная схема расщепления [1, 4].

Результаты

Разработанные численные модели относятся к классу «diagnostic models». Данные модели учитывают основные физические факторы, влияющие на развитие чрезвычайной ситуации, но при этом требуют небольших затрат компьютерного времени при практической реализации на компьютерах малой и средней мощности (время расчета от нескольких секунд до нескольких минут). Эти модели используются для быстрого серийного

расчета разнообразных сценариев чрезвычайных ситуаций и диагностики интенсивности загрязнения окружающей среды.

Ниже (рис. 2) показаны результаты применения первой модели, основанной на уравнениях Навье-Стокса для расчета формирования зоны загрязнения атмосферного воздуха в случае выхода из вагона струи – продуктов горения твердого ракетного топлива. Рядом с вагоном располагается здание. Хорошо видно, что продукты горения твердого ракетного топлива быстро достигают здания и создают угрозу токсичного поражения людей, как возле здания, так и внутри здания (рис. 2б).

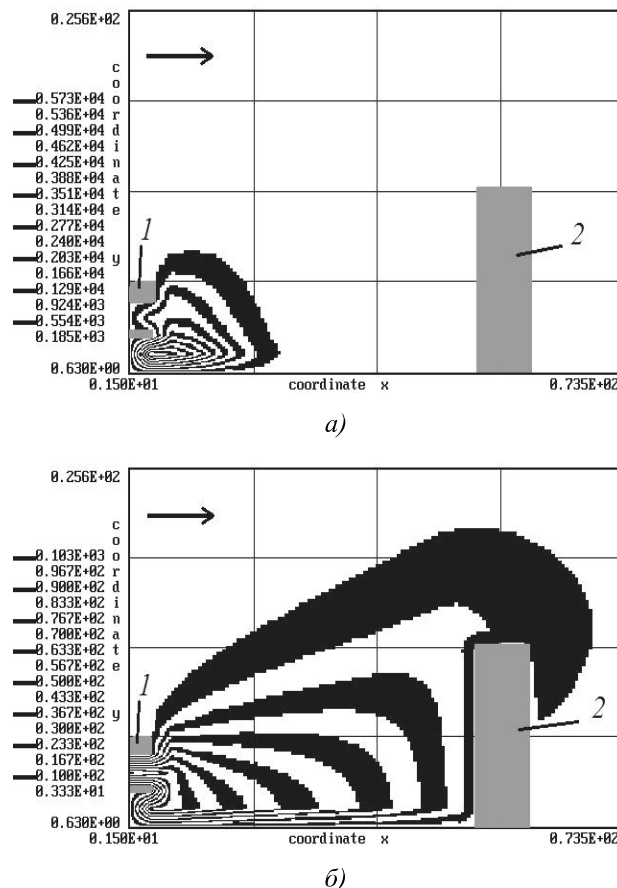


Рис. 2. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени (а – $t=2,5$ с, б – $t=14,5$ с): 1 – железнодорожный вагон, 2 – здание

Contamination area of the atmosphere for time (а – $t=2,5$ s, б – $t=14,5$ s): 1 – railway carriage, 2 – building

На рис. 3 представлены результаты применения второй численной модели, которая основана на трехмерном уравнении переноса примеси. Рассматривалась ситуация возгорания твердого ракетного топлива в вагоне при транспортировке его на территории химического завода.

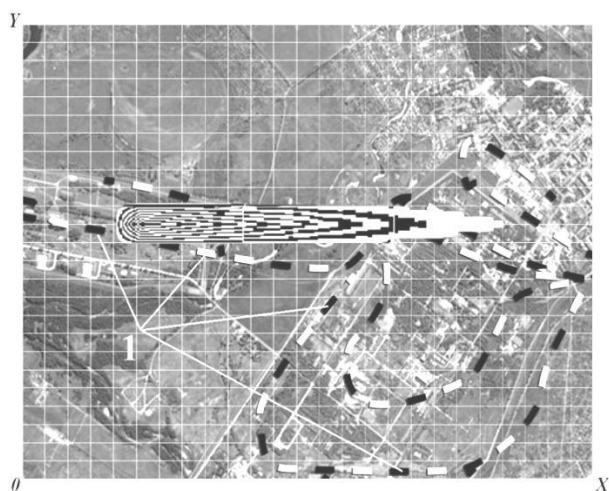


Рис. 3. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t=500$ с (высота $z=12$ м): 1 – железнодорожное полотно на территории химически опасного объекта

Contamination area of the atmosphere for time $t=500$ s (height $z=12$ m): 1 – the railroad in the territory of chemically dangerous object

Как видно из рис. 3, при возможной аварии в случае транспортировки опасного груза, происходит масштабное химическое загрязнение примыкающей территории, на которой

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. 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. Modelirovaniye nestatsionarnykh protsessov avariynogo zagryazneniya atmosfery [Modeling of non-stationary processes of emergency air pollution]. Dnipropetrovsk, Aktsent PP Publ., 2014. 127 p. [http://](http://.....)

2. Бруцкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруцкий. – К.: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.

Bruyatskiy Ye.V. Teoriya atmosfernoy diffuzii radioaktivnykh vybrosov [Theory of atmospheric diffusion of radioactive emissions]. Institut gidromekhaniki NAN Ukrainy Kyiv, 2000, 443 p.

располагаются здания химического завода. Таким образом, возникает угроза поражения людей.

Научная новизна и практическая значимость

Созданы численные модели, позволяющие учесть существенные факторы, влияющие на процесс рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере, и формирование зоны загрязнения при чрезвычайных ситуациях на железнодорожном транспорте связанных с эмиссией химически опасных веществ.

Выводы

1. Рассмотрены эффективные численные модели «diagnostic models» для экспресс расчета уровня загрязнения атмосферы при аварийных ситуациях в случае перевозки железнодорожным транспортом твердого ракетного топлива. Предложенные модели позволяют рассчитать 2D гидродинамику ветрового потока и процесс массопереноса опасных веществ в атмосфере.

2. Дальнейшее совершенствование модели следует проводить в направлении ее развития для расчета 3D переноса примеси в атмосфере с учетом аэродинамики воздушных потоков.

[http://](http://.....)

3. Методика прогнозування наслідків вилиття (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. – К., 2001. – 33 с.

Metodyka prognozuvannya naslidkiv vylivu (vykydu) nebezpechnykh khimichnykh rechovyn pry avariyakh na promyslovykh ob'ektakh i transporti [Methods predict the consequences of the outpouring (emission) of hazardous chemicals in accidents at industrial sites and transport]. Kyiv, 2001, 33 p. [http://](http://.....)

4. 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 it's Application. – Torino, Italy, 2010. – № P1.7.

[http://](http://.....)

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

Поступила в редколлегию 07.09.2015