

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 502.3:[504.5:519.87]

Н. Н. БЕЛЯЕВ<sup>1\*</sup>, И. В. КАЛАШНИКОВ<sup>2</sup>, В. И. ШИНКАРЕНКО<sup>3</sup>, В. Н. ГОРЯЧКИН<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Харьковское отделение филиала «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта» акционерного общества «Українська залізниця», ул. Котляра, 7, Харьков, Украина, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, эл. почта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>3</sup>Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта shinkarenko\_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>4</sup>Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, эл. почта vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

### ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЯХ НА ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ

**Цель.** Работа предполагает разработку численных моделей для оценки эффективности применения воздушной завесы возле здания в случае химического загрязнения. **Методика.** Для описания процесса рассеивания химически опасного вещества, эмитированного при чрезвычайных ситуациях, использовано трехмерное уравнение массопереноса примеси в атмосферном воздухе. Для расчета поля скорости воздушной среды возле здания при наличии воздушной завесы использована модель потенциального течения. Моделирующие уравнения учитывают поле скорости ветрового потока, атмосферную диффузию, интенсивность выброса химически опасного вещества в атмосферу. Для численного интегрирования уравнений массопереноса использованы неявные разностные схемы. Применение разработанной модели позволяет оперативно рассчитывать поле концентрации химически опасного вещества возле здания при наличии воздушной завесы. **Результаты.** Построены численные модели для расчета аэродинамики воздушного потока и концентрационного поля возле здания при использовании воздушной завесы. Их можно применить для проведения оперативных расчетов размеров, интенсивности зон загрязнения, которые формируются в атмосфере при выбросе химических веществ на промышленных площадках. Разработанные численные модели могут быть реализованы на компьютерах малой и средней мощности, что позволяет широко использовать их для решения задач при разработке плана ликвидации при аварийной ситуации (ПЛАС). Для практического применения этих моделей необходима стандартная входная информация. Представлены результаты лабораторного эксперимента. **Научная новизна.** Предложены эффективные трехмерные численные модели для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха при выбросе в атмосферу химически опасных веществ и при использовании воздушной завесы возле промышленного здания. Модели позволяют оперативно рассчитать эффективность применения воздушной завесы. **Практическая значимость.** Разработанные численные модели позволяют решать прикладные задачи, возникающие при разработке ПЛАСа для химически опасных объектов.

*Ключевые слова:* химическое загрязнение атмосферы; чрезвычайная ситуация; численное моделирование

## Введение

В области промышленной безопасности можно выделить две важные задачи: прогноз уровня загрязнения окружающей среды при экстремальных ситуациях на промышленных объектах, связанных с выбросом химически опасных веществ, и защита окружающей среды от загрязнения [1–4, 7–14]. Для оценки размеров зон химического заражения в Украине используют нормативную методику прогноза последствий аварий на химически опасных объектах и транспорте, а также методику ОНД-86. Кроме этого, для решения задач по расчету зон химического заражения широко применяют модель Гаусса [4]. Для решения второй задачи можно использовать только CFD-моделирование [2, 3, 5, 11] или физический эксперимент. Актуальной задачей остается разработка эффективных методов защиты атмосферы от загрязнения при аварийных ситуациях, поскольку именно атмосфера подвергается загрязнению в первую очередь.

## Цель

Основной целью данной работы является разработка численных моделей для проведения исследований по оценке эффективности применения воздушной завесы возле зданий, чтобы минимизировать уровень химического загрязнения.

## Методика

Воздушная завеса – это использование направленного движения воздуха с целью изменения направления движения облака токсичного вещества. Использование воздушной завесы у промышленных зданий позволяет создать локальные зоны, где величина поражающего фактора – концентрации опасного вещества – значительно меньше, чем при отсутствии завесы. На этапе принятия решения нужно определить эффективность использования воздушной завесы с учетом размеров здания, скорости ветра, скорости воздушного потока завесы и т. д.

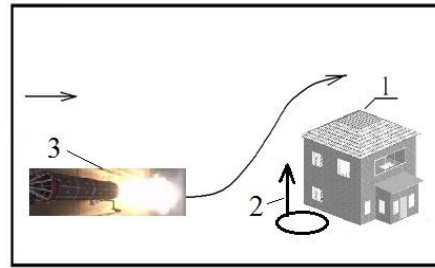


Рис. 1. Схема использования воздушной завесы у промышленного здания:  
1 – здание; 2 – воздушная завеса; 3 – источник выброса химически опасного вещества

Fig. 1. Air curtain scheme at an industrial building:  
1 – building; 2 – air curtain; 3 – source of emission of a chemically hazardous substance

На первом этапе исследований была выдвинута рабочая гипотеза о том, что применение воздушной завесы возле промышленного здания позволяет снизить концентрацию опасного вещества в случае возникновения экстремальной ситуации. Для проверки этой гипотезы был проведен эксперимент. Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Эксперименты проведены на кафедре «Гидравлика и водоснабжение» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДНУЖТ).

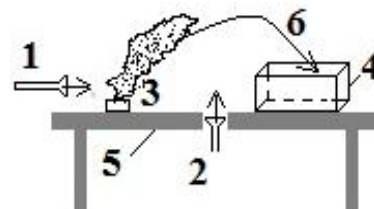


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:  
1 – воздуходувка; 2 – воздуходувка;  
3 – место эмиссии опасного вещества;  
4 – модель здания; 5 – стол;  
6 – пространство внутри модели здания

Fig. 2. Scheme of the experimental facility:  
1 – blower; 2 – blower; 3 – emission point of a hazardous substance; 4 – a building model; 5 – table; 6 – space inside a building model

Моделирование проведено в масштабе 1:100. Размеры модели здания: высота 10 см, ширина 30 см, длина 30 см. Скорость воздушного потока составляла 5,7–6,1 м/с (воздуходувка 1). Скорость воздушной струи составляла 8,6–9,1 м/с (воздуходувка 2).

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Результаты эксперимента представлены на рис. 3 и 4.

Как видно из рис. 3, при отсутствии воздушной завесы струя продуктов горения практически полностью охватывает торцевую сторону модели здания (линии 1–1 и А–С) и «заходит» над зданием и внутрь модели через отверстие сверху (позиция С на рис. 3).

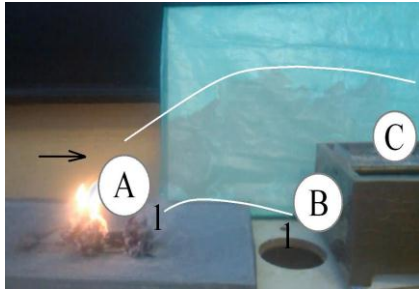


Рис. 3. Зона загрязнения возле модели здания (нет воздушной завесы):  
А–В – нижняя граница шлейфа;  
А–С – верхняя граница шлейфа

Fig. 3. Pollution area near a building model (no air curtain):  
А–В – lower bound of a plume;  
А–С – high bound of a plume

На рис. 4 представлена зона загрязнения при наличии воздушной завесы возле модели здания.

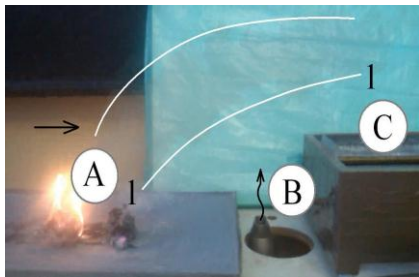


Рис. 4. Зона загрязнения возле модели здания (есть воздушная завеса):  
1–1 – нижняя граница шлейфа; А – источник эмиссии опасного вещества; В – середина торцевой стенки модели;  
С – сечение, где проводились измерения (над моделью здания и внутри ее)

Fig. 4. Pollution area near the building model (there is an air curtain):  
1–1 – lower bound of a plume; А – a source of emission of a hazardous substance; В – center of the end wall in a model; С – section where measurements were taken (above a building model and inside it)

Из данного рисунка видно, что воздушная завеса привела к отклонению загрязненной струи от модели здания (линия 1–1 – нижняя

граница струи), т. е. эффект защиты наблюдается визуально.

Проведение физического эксперимента для оценки эффективности применения воздушной завесы возле здания требует много времени на его постановку, реализацию, обработку данных. Поэтому для практики важно иметь теоретические методы оценки эффективности применения воздушной завесы, чтобы быстро определять рациональные параметры этой системы защиты для конкретных местных условий. Поэтому на следующем этапе исследования были разработаны численные модели для решения поставленной задачи.

Для расчета концентрационных полей химического агента возле здания при использовании воздушной завесы применяют трехмерное уравнение массопереноса [2, 3, 5, 9]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} + \sigma C =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) +$$

$$+ \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)) \delta(z - z_i), \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация химического агента;  $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  – коэффициенты турбулентной диффузии;  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий вымывание химического агента осадками или его химическую трансформацию в атмосфере;  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости ветра;  $w_s$  – скорость гравитационного оседания химического агента;  $Q$  – интенсивность выброса химического агента;  $\delta(x - x_i)(y - y_i)(z - z_i)$  – дельта-функция Дирака;  $x_i, y_i, z_i$  – координаты источника выброса химически опасного вещества;  $t$  – время.

Принимаем, что устойчивость атмосферы определяют значением коэффициентов атмосферной диффузии.

Так как задача состоит в создании численных моделей для оценки эффективности применения воздушной завесы с целью снижения уровня загрязнения воздушной среды возле здания, то возникает необходимость расчета неравномерного поля скорости воздушного по-

---

 ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА
 

---

тока возле здания. Для решения этой задачи будем применять модель безвихревых течений идеальной жидкости:

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

где  $P$  – потенциал скорости.

Для расчета компонент вектора скорости ветра используют зависимости:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}; \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}.$$

При численном решении трехмерного уравнения для потенциала скорости выполним такое расщепление на дифференциальном уровне:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2};$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2};$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}.$$

Для аппроксимации каждого уравнения из данной системы будем использовать такие разностные выражения:

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i-1,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x};$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x};$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i,j-1,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta y};$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y};$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i,j,k-1}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta z};$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z}.$$

Для численного интегрирования трехмерного уравнения массопереноса будем использовать неявную попеременно-треугольную разностную схему расщепления [2, 5]. Исходное моделирующее уравнение расщепляют на три уравнения. Первое уравнение учитывает рассеивание примеси только за счет ветрового потока, второе – за счет атмосферной диффузии, третье учитывает влияние источника эмиссии на формирование зоны загрязнения. Для кодирования разностных уравнений использован FORTRAN.

При применении разработанных численных моделей для решения задач рассматриваемого класса необходимо задать такую информацию:

- размеры расчетной области;
- геометрическую форму здания (зданий);
- параметры набегающего воздушного потока;
- место расположения воздушной струи;
- скорость воздушной струи;
- форму облака химического агента, которое движется на здание;
- концентрацию химического агента в облаке.

### Результаты

Разработанные численные модели были использованы для решения прикладной задачи. Постановка задачи: рассматриваем миграцию первичного облака хлора с концентрацией  $C = 100$  единиц (концентрация дана в безразмерном виде). Скорость ветра 4 м/с. На пути облака располагается здание. Возле неветреной стороны здания создаем воздушную завесу для снижения концентрации химического агента.

На рис. 5–8 показано концентрационное поле хлора возле здания при отсутствии воздушной завесы и при ее применении.

Анализируя зоны химического загрязнения, которые представлены на приведенных рис. 5–8, мы видим, что при использовании воздушной завесы зона загрязнения (граница токсичного облака) отдалается от промышленного здания, то есть происходит гидродинамическое влияние воздушной струи на формирование зоны химического загрязнения.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

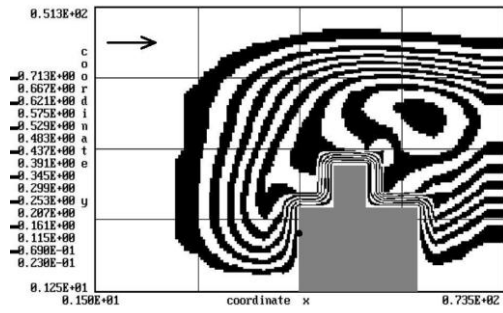


Рис. 5. Зона загрязнения у промышленного здания для момента времени  $t = 5,5$  с. (нет воздушной завесы, сечение  $y = 25$  м)

Fig. 5. Pollution zone at an industrial building for timepoint  $t = 5.5$  s. (no air curtain, section  $y = 25$  m)

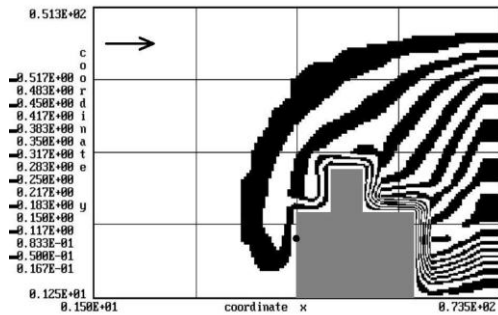


Рис. 6. Зона загрязнения у промышленного здания для момента времени  $t = 7,5$  с. (нет воздушной завесы, сечение  $y = 25$  м)

Fig. 6. Pollution zone at an industrial building for timepoint  $t = 7.5$  s. (no air curtain, section  $y = 25$  m)

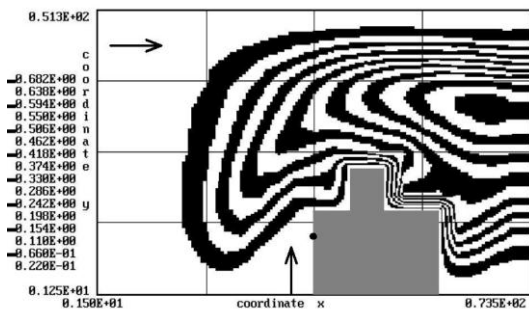


Рис. 7. Зона загрязнения у промышленного здания для момента времени  $t = 5,5$  с. (воздушная завеса, сечение  $y = 25$  м, скорость воздушного потока 20 м/с)

Fig. 7. Pollution zone at an industrial building for timepoint  $t = 5.5$  s. (no air curtain, section  $y = 25$  m, air-flow rate 20 m/s)

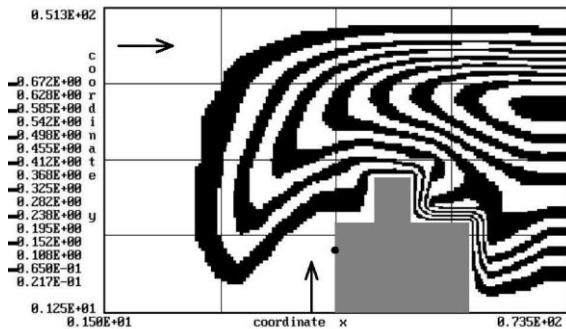


Рис. 8. Зона загрязнения у промышленного здания для момента времени  $t = 5,5$  с. (воздушная завеса, сечение  $y = 25$  м, скорость воздушного потока 30 м/с)

Fig. 8. Pollution zone at an industrial building for timepoint  $t = 5.5$  s. (no air curtain, section  $y = 25$  m, air-flow rate 30 m/s)

В табл. 1 приведены данные о концентрации химически опасного вещества в реперной точке у промышленного здания – это место показано на рис. 5–8 в виде точки на стенке здания.

Таблица 1

Безразмерное значение концентрации опасного вещества у промышленного здания

Table 1

Dimensionless concentration of a hazardous substance at an industrial building

Время	Концентрация (нет воздушной завесы)	Концентрация (скорость воздушного потока 20 м/с)	Концентрация (скорость воздушного потока 30 м/с)
3,1	0,238	0,018	0,0041
3,5	0,273	0,017	0,0037
4,5	0,316	0,013	0,0025
5,5	0,300	0,008	0,0014

Как видно из табл. 1, использование воздушной завесы позволяет существенно уменьшить концентрацию опасного вещества у здания. Например, для момента времени 5,5 с концентрация опасного вещества в точке расположения рецептора при наличии воздушной завесы (скорость струи 30 м/с) в 210 раз меньше, чем при отсутствии завесы. То есть использование воздушной завесы позволяет снизить

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

риск токсического поражения людей у промышленного корпуса.

Отметим, что время расчета составляет порядка 7 с.

### Научная новизна и практическая значимость

В статье рассмотрены численные 3D-модели для оценки эффективности применения воздушной завесы возле здания. Для расчета неравномерного поля скорости воздушного потока возле здания применена модель безвихревых течений несжимаемой среды. Для расчета концентрационных полей использовано уравнение массопереноса.

При применении разработанных численных моделей используют стандартную входную информацию. Особенностью моделей является быстрота расчета, что позволяет их использовать при проведении серийных расчетов.

### Выводы

В работе представлены численные 3D-модели для оценки эффективности применения воздушной завесы. Расчет выполнен на базе фундаментальных уравнений механики сплошной среды. Дальнейшее совершенствование выбранного научного направления следует проводить в области создания 3D-модели для расчета загрязнения воздушной среды на базе уравнений Навье–Стокса.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алымов, В. Т. Техногенный риск: Анализ и оценка : учеб. пособие для вузов / В. Т. Алымов, Н. П. Тарасова. – Москва : Академкнига, 2004. – 118 с.
2. Беляев, Н. Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, Н. В. Росточило. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 136 с.
3. Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. С. Кириченко, Л. Я. Мунтян. – Кривой Рог : Р. А. Козлов, 2017. – 127 с.
4. Стоецкий, В. Ф. Оценка риска при авариях техногенного характера / В. Ф. Стоецкий, В. И. Голинько, Л. В. Дранишников // Наук. вісн. НГУ. – 2014. – № 3. – С. 117–124.
5. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.
6. Bai, Y. Grey Mathematics Model for Atmospheric Pollution Based on Numerical Simulation / Y. Bai // Chemical Engineering Transactions. – 2018. – Vol. 71. – P. 679–684. doi: <http://doi.org/10.3303/CET1871114>
7. Barret, A. M. Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness : Degree of Doctor of Philosophy / Anthony Michael Barret ; Carnegie Mellon University. – Pittsburg, Pennsylvania, 2009. – 123 p.
8. Berlov, O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo / O. V. Berlov // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 48–54. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2016/60953>
9. Biliaiev, M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. – Dordrecht, 2012. – P. 87–91. doi: [http://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8\\_15](http://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15)
10. Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations [Электронный ресурс] / Stoner-i. – Режим доступа: <http://clc.am/OnkmUw> – Загл. с экрана. – Проверено : 29.03.2019.
11. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling / Z. Naserzadeh, F. Atabi, F. Moattar, N. M. Nejad // Bioscience Biotechnology Research Communications. – 2017. – Vol. 10 (1). – P. 192–204.
12. Oyjinda, P. Numerical Simulation to Air Pollution Emission Control near an Industrial Zone [Электронный ресурс] / P. Oyjinda, N. Pochai // Advances in Mathematical Physics. – 2017. – Vol. 2017. – Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/amp/2017/5287132/> – Загл. с экрана. – Проверено : 23.04.2019. doi: <http://doi.org/10.1155/2017/5287132>

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

13. Protective Action Criteria. A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations [Електронний ресурс] // Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. – Edmonton, Alberta, 2017. – Режим доступу: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> – Загл. с екрана. – Проверено : 23.04.2019.
14. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes [Електронний ресурс] / O. Zavila, P. Dobes, J. Dlabka, J. Bitta // The science for population protection. – 2015. – № 2. – Режим доступу: <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> – Загл. с екрана. – Проверено : 23.04.2019.

М. М. БЛЯЄВ<sup>1\*</sup>, І. В. КАЛАШНИКОВ<sup>2</sup>, В. І. ШИНКАРЕНКО<sup>3</sup>, В. М. ГОРЯЧКІН<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2</sup>Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» акціонерного товариства «Українська залізниця», вул. Котляра, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта [uzp38@ukr.net](mailto:uzp38@ukr.net), ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>3</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта [shinkarenko\\_vi@ua.fm](mailto:shinkarenko_vi@ua.fm), ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>4</sup>Каф. «Теплотехніка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, ел. пошта [vgora@ukr.net](mailto:vgora@ukr.net), ORCID 0000-0002-6115-7162

## ЗАХИСТ АТМОСФЕРИ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ ПІД ЧАС ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИТУАЦІЙ НА ХІМІЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

**Мета.** Робота передбачає розробку чисельних моделей для оцінки ефективності застосування повітряної завіси біля будівлі у разі хімічного забруднення. **Методика.** Для описання процесу розсіювання хімічно небезпечної речовини, емітованої за надзвичайних ситуацій, використано тривимірне рівняння масопереносу домішки в атмосферному повітрі. Для розрахунку поля швидкості повітряного середовища біля будівлі за наявності повітряної завіси використано модель потенційної течії. Моделювальне рівняння враховує поле швидкості вітрового потоку, атмосферну дифузію, інтенсивність викиду хімічно небезпечної речовини в атмосферу. Для чисельного інтегрування рівнянь масопереносу використані неявні різницеві схеми. Застосування розробленої моделі дозволяє оперативно розраховувати поле концентрації хімічно небезпечної речовини біля будівлі за наявності повітряної завіси. **Результати.** Побудовані чисельні моделі для розрахунку аеродинаміки повітряного потоку й концентраційного поля біля будівлі з використанням повітряної завіси. Їх можна застосувати для проведення оперативних розрахунків розмірів, інтенсивності зон забруднення, які формуються в атмосфері під час викиду хімічних речовин на промислових майданчиках. Розроблені чисельні моделі можуть бути реалізовані на комп'ютерах малої й середньої потужності, що дозволяє широко використовувати їх для вирішення завдань під час розробки плану ліквідації в разі аварійної ситуації (ПЛАС). Для практичного застосування цих моделей необхідна стандартна вхідна інформація. Представлені результати лабораторного експерименту. **Наукова новизна.** Запропоновано ефективні тривимірні чисельні моделі для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря під час викиду в атмосферу хімічно небезпечних речовин і використання повітряної завіси біля промислової будівлі. Моделі дозволяють оперативно розрахувати ефективність застосування повітряної завіси. **Практична значимість.** Розроблені чисельні моделі дозволяють розв'язувати прикладні задачі, що виникають під час розробки ПЛАСу для хімічно небезпечних об'єктів.

*Ключові слова:* хімічне забруднення атмосфери; надзвичайна ситуація; чисельне моделювання

M. M. BILIAIEV<sup>1\*</sup>, I. V. KALASHNIKOV<sup>2</sup>, V. I. SHYNKARENKO<sup>3</sup>, V. M. HORIACHKIN<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Kharkiv Branch Office «Design and Research Institute of Railway Transport» of the Public Joint Stock Company «Ukrainian Railway», Kotliar St., 7, Kharkiv, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>3</sup>Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail shinkarenko\_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>4</sup>Dep. «Heat Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

## ATMOSPHERE PROTECTION FROM POLLUTION IN ACCIDENTAL SITUATIONS AT CHEMICALLY HAZARDOUS OBJECTS

**Purpose.** The work involves the development of numerical models to assess the effectiveness of the air curtain usage near the building in the event of chemical pollution. **Methodology.** To describe the process of dispersion of a chemically hazardous substance, emitted in emergency situations, the three-dimensional equation of impurity mass transfer in atmospheric air is used. To calculate the air velocity field near the building in the presence of an air curtain, a potential-flow model is used. The modelling equations take into account the velocity field of the wind flow, atmospheric diffusion, and the intensity of the emission of a chemically hazardous substance into the atmosphere. For the numerical integration of the mass transfer equations, implicit difference schemes are used. The complex of programs was created to solve the problem of calculating pollution zones near buildings in the presence of an air curtain. The application of the developed model allows you to quickly calculate this field of concentration of a chemically hazardous substance near the building in the presence of an air curtain. **Findings.** Numerical models for calculating the aerodynamics of the air flow and the concentration field near the building when using an air curtain were constructed. They can be used to carry out operational calculations of the size, intensity of pollution zones, which are formed in the atmosphere during the emission of chemicals at industrial sites. The developed numerical models can be implemented on computers of low and medium power, which allows it to be widely used for solving problems in developing an emergency response plan (ERP). For practical application of the developed numerical models, standard input information is required. Authors present the results of a laboratory experiment. **Originality.** Effective three-dimensional numerical models are proposed for estimating the level of atmospheric air pollution when emission of chemically hazardous substances into the atmosphere and using an air curtain near an industrial building. Models allow you to quickly calculate the effectiveness of the air curtain usage. **Practical value.** The developed numerical models allow solving applied problems arising in the development of ERP for chemically hazardous objects.

*Keywords:* chemical pollution of the atmosphere; emergency; numerical simulation

### REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk: Analiz i otsenka: Uchebnoe posobie dlya vuzov*. Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., Kirichenko, P. S., & Muntian, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogennogo riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoy Rog: Kozlov R. A. (in Russian)
4. Stoetsky, V. F., Golinko, V. I., & Dranishnikov, L. V. (2014). Risk assessment in man-caused accidents. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 3, 117-124. (in Russian)
5. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Biliaiev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
6. Bai, Y. (2017). Grey Mathematics Model for Atmospheric Pollution Based on Numerical Simulation. *Chemical Engineering Transactions*, 71, 679-684. doi: <http://doi.org/10.3303/CET1871114> (in English)
7. Barret, A. M. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectivness*. (Doctoral dissertation). Carnegie Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania. (in English)



## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

8. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2016/60953> (in English)
9. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2012). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*. Dordrecht. doi: [http://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8\\_15](http://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15) (in English)
10. Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations. *Croner-i*. Retrieved from <http://clc.am/OnkmUw> (in English)
11. Naserzadeh, Z., Atabi, F., Moattar, F., & Nejad, N. M. (2017). Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling. *Bioscience Biotechnology Research Communications*, 10(1), 192-204. (in English)
12. Oyjinda, P., & Pochai, N. (2017). Numerical Simulation to Air Pollution Emission Control near an Industrial Zone. *Advances in Mathematical Physics*, 2017. Retrieved from <https://www.hindawi.com/journals/amp/2017/5287132/> doi: <http://doi.org/10.1155/2017/5287132> (in English)
13. Government of Alberta. (2017). Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta. Retrieved from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
14. Zavila, O., Dobes, P., Dlabka, J., & Bitta, J. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The Science for Population Protection*, 2. Retrieved from <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> (in English)

Поступила в редколлегию: 06.02.2019

Принята к печати: 03.06.2019