

---

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

---

УДК 502.3:504.5

Н. Н. БЕЛЯЕВ<sup>1\*</sup>, А. В. БЕРЛОВ<sup>2</sup>, И. В. КАЛАШНИКОВ<sup>3\*</sup>, В. А. КОЗАЧИНА<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>Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24 а, Днипро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, эл. почта berlov@mail.pgsa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>3\*</sup>ГП «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта «Укрзалізничпроект», ул. Конарева, 7, Харьков, Украина, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, эл. почта uzr38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>4\*</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 v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

### АНТИТЕРРОРИСТИЧЕСКИЙ ИНЖИНИРИНГ ПРИ ВОЗМОЖНОМ ТЕРАКТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКОГО АГЕНТА НА УЛИЦЕ

**Цель.** Данная работа предусматривает разработку метода локального снижения на улице концентрации химически опасного вещества, которое поступило в атмосферу через вентиляционный выброс на крыше кафе, а также создание численной модели для расчета зоны химического заражения, позволяющей оценить эффективность применения экранов, минимизирующих его уровень. **Методика.** Для решения поставленной задачи использовано уравнение для потенциала скорости, на базе которого определено поле скорости воздушного потока, и уравнение конвективно-диффузионного рассеивания химически опасного агента в атмосферном воздухе, выброшенного в случае теракта через систему вентиляции. При моделировании были учтены неравномерное поле скорости ветрового потока, атмосферная диффузия, интенсивность выброса химически опасного агента. При численном интегрировании уравнения для потенциала скорости использован метод Либмана. Для численного решения уравнения конвективно-диффузионного рассеивания примеси использована неявная поперечно-треугольная разностная схема расщепления. **Результаты.** На основе разработанной численной модели дана оценка эффективности применения экранов на здании для снижения концентрации опасного вещества и минимизации риска токсичного поражения людей на улице при инициированном выбросе химического агента. Построенная численная модель может быть реализована на компьютерах малой и средней мощности, что позволяет широко использовать ее для решения задач рассматриваемого класса при разработке стратегии антитеррористического инжиниринга. **Научная новизна.** Предложена эффективная численная модель для расчета зоны заражения людей на улице при возможном теракте с использованием химического (биологического) агента. Модель также может быть применена для оценки эффективности некоторых защитных мероприятий, направленных на снижение уровня загрязнения воздушной среды при теракте. **Практическая значимость.** Разработанная численная модель может быть использована для организации защитных мероприятий возле социальных объектов возможной химической атаки террориста.

**Ключевые слова:** теракт; химическое загрязнение атмосферы; антитеррористический инжиниринг; численное моделирование

#### Введение

Террористические акты с применением химических (биологических) агентов на улицах городов являются небеспочвенной угрозой.

Одним из вариантов достаточно скрытного для наблюдателя поступления опасного химического агента в атмосферу может быть его сброс в систему вентиляции различных кафе, которые располагаются на улицах городов (рис. 1). Вы-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

брос загрязненного воздуха из системы вентиляции кафе осуществляется, как правило, на крыше. С научной точки зрения, это выброс из низкого источника.

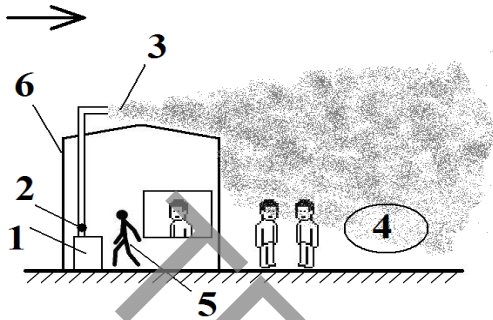


Рис. 1. Схема химического заражения воздушной среды на улице при инициированном поступлении опасного вещества в систему вентиляции кафе:

- 1 – технологическое оборудование;
- 2 – место поступления опасного вещества в систему вентиляции; 3 – устройство выброса загрязненного воздуха на крыше кафе;
- 4 – зона химического заражения на улице;
- 5 – инициатор сброса опасного вещества в систему вентиляции; 6 – здание кафе

При таком выбросе химического агента через систему вентиляции за зданием может сформироваться достаточно обширная зона химического заражения. Например, на рис. 2 представлено фото зоны загрязнения возле мини-кафе. Выброс – продукты процесса горения на кухне. Хорошо видно, что зона загрязнения охватывает не только тротуар, но и часть авто-трассы. Если в эту зону химического заражения попадут люди, риск их токсикации крайне велик. Подчеркнем, что люди обязательно попадут в зону заражения, т. к. кафе – это места широкого пользования. Кроме этого, при таком сценарии террористической атаки обеспечена внезапность и скрытность. В этой связи возникает вопрос о разработке инженерных методов защиты людей от поражения путем снижения концентрации опасного вещества на улице при возможной террористической атаке.

Теоретическое решение данной задачи является достаточно сложным. При эмиссии химического агента от низкого источника необходимо, во-первых, учесть влияние здания на формирование зоны химического заражения. Во-вторых, важно, чтобы математическая модель позволяла также рассчитывать эффективность применения конкретных инженерных



Рис. 2. Зона загрязнения атмосферного воздуха возле кафе:

- 1 – устройство выброса загрязненного воздуха на крыше;
- 2 – видимая граница зоны загрязнения (просп. Героев, г. Днипро)

решений на снижение интенсивности химического заражения воздушной среды возле объекта. Для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха при возможном теракте в качестве нулевого приближения можно использовать, например, Гауссовы модели. Но эти модели не позволяют учесть влияния здания и различных инженерных элементов на формирование зон химического заражения, т. е. их нельзя применять для оценки эффективности различных антитеррористических методов. Нормативные методики, используемые в Украине для решения задач по оценке размеров зон химического заражения (например, методика ОНД-86), по этой причине также не могут быть применены. Единственным теоретическим методом решения задач данного класса является CFD-моделирование. В рамках этого научного направления созданы специализированные пакеты программ «ANSYS Fluent», «FAST» и др. Эти пакеты представляют собой мощный инструмент решения широкого класса задач. Отметим, что стоимость лицензированных пакетов для проведения научных исследований очень высокая, поэтому доступ к таким пакетам ограничен. Также известно, что применение данных пакетов требует использования мощных компьютеров и больших затрат компьютерного времени при решении практической задачи – порядка нескольких

## ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТІ

суток на расчет одного варианта задачи. Это является определенным препятствием, ведь в организациях специальной направленности проводят многочисленные серийные расчеты.

### Цель

Данная работа предусматривает разработку метода локального снижения на улице концентрации химически опасного вещества, которое поступило в атмосферу через вентиляционный выброс кафе, а также создание численной модели для оценки эффективности инженерных методов защиты воздушной среды от загрязнения при теракте с применением высокотоксичного химического агента.

### Методика

Процесс рассеивания высокотоксичного химического агента на улице может быть описан на базе следующего уравнения (профильная задача) [2–5, 7, 8]:

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

где  $C$  – осредненная концентрация химического (биологического) агента в атмосферном воздухе;  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий распад агента в атмосфере;  $u, v$  – компоненты вектора скорости воздушного потока;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии;  $Q$  – интенсивность выброса агента при теракте;  $\delta(x - x_0) \delta(y - y_0)$  – дельта-функция Дирака;  $x_0, y_0$  – координаты источника эмиссии агента при теракте;  $t$  – время.

Краевые условия для уравнения (2) записывают так [3]: при  $t = 0$ ,  $C = 0$ . На границах, где воздушный поток входит в расчетную область,  $C = C_{in}$ , здесь  $C_{in}$  – известная величина. Мы принимаем, что  $C_{in} = 0$ . На участке, где воздушный поток выходит из расчетной области, в численной модели ставят «мягкое»

граничное условие вида:  $C_{i+1,j} = C_{i,j}$ , здесь  $C_{i+1,j}$  – концентрация загрязнителя в граничной (последней) ячейке.

**Модель аэродинамики.** Для применения уравнения (1) в случае рассеивания химического (биологического) агента при наличии здания необходимо знать неравномерное поле скорости ветрового потока. Для определения поля скорости ветрового потока  $u = f(x, y)$ ,  $v = f(x, y)$  будем использовать модель безвихревого течения идеальной жидкости [5]:

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

где  $P$  – потенциал скорости.

Компоненты вектора скорости воздушного потока определяем зависимостью вида:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (3)$$

Для уравнения (2) имеют место такие граничные условия:

– на твердых границах ставим условие вида:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0,$$

где  $n$  – единичный вектор внешней нормали к границе;

– на границе выхода воздушного потока из расчетной области ставим граничное условие  $P = \text{const}$ ;

– на тех границах, где происходит втекание воздушного потока, ставим граничное условие

вида:  $\frac{\partial P}{\partial n} = V$ , где  $V$  – известная скорость ветрового потока.

**Численное решение задачи.** Для численного интегрирования моделирующих уравнений будем использовать конечно-разностные методы решения.

Проведем аппроксимацию производных, следуя [2, 5]. Аппроксимацию производной по времени осуществляем так:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Первые производные аппроксимируют соотношениями [5]:

$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

где

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

Для аппроксимации первых производных используем формулы [2, 5]:

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

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

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

Для аппроксимации вторых производных используем зависимости [5]:

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

$$= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) \approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} - \mu_y \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} =$$

$$= M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.$$

С учетом приведенных обозначений разностных операторов записываем разностный аналог уравнения (1):

$$\frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} +$$

$$+ L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} =$$

$$= (M_{xx}^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1}) +$$

$$+ Q_{ij} \delta_{ij}. \quad (4)$$

Проведем расщепление разностного уравнения (4). Уравнения расщепления на каждом шаге записывают так:

– на первом шаге ( $k = n + \frac{1}{4}$ ):

$$\frac{C_{i,j}^{n+k} - C_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k =$$

$$= \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n), \quad (5)$$

– на втором шаге ( $k = n + \frac{1}{2}; c = n + \frac{1}{4}$ ):

$$\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k =$$

$$= \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c), \quad (6)$$

– на третьем шаге ( $k = n + \frac{3}{4}; c = n + \frac{1}{2}$ )

применяем зависимость (6);

– на четвертом шаге ( $k = n + 1; c = n + \frac{3}{4}$ )

применяем зависимость (5).

Искомое значение функции  $C$  на каждом дробном шаге (5), (6) определяем по формуле бегущего счета.

На последнем шаге решаем уравнение:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Q \delta(x - x_0) \delta(y - y_0).$$

Для решения данного уравнения применяют метод Эйлера.

Для численного решения уравнения (2) используем метод Либмана. Аппроксимирующее уравнение для потенциала скорости в этом случае записываем в виде:

$$\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0.$$

Значение потенциала  $P_{ij}$  скорости рассчитываем в центрах разностных ячеек по формуле:

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

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

$$\text{where } A = \left( \frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2} \right).$$

Для программной реализации построенной численной модели был использован FORTRAN.

## Результаты

Разработанная CFD-модель была использована для решения следующей модельной задачи. Рассматриваем выброс высокотоксичного химического агента через систему вентиляции, выход из которой находится на крыше кафе. Схема расчетной области представлена на рис. 3.

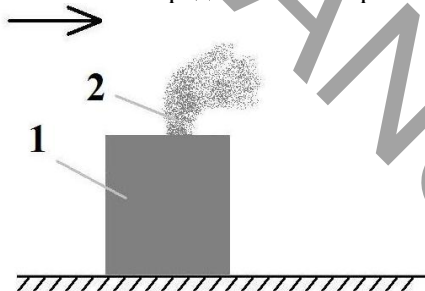


Рис. 3. Схема эмитсии химического агента на крыше кафе (нет элементов защиты):  
1 – здание кафе; 2 – место эмитсии химического агента

Для минимизации уровня загрязнения воздушной среды возле кафе, в качестве антитеррористического метода, используем установку на крыше вертикального (рис. 4) или наклонного экрана (рис. 6).

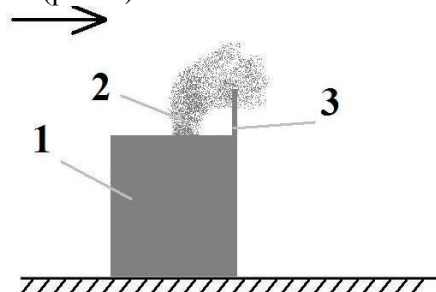


Рис. 4. Схема эмитсии химического агента на крыше кафе (защитная мера – вертикальный экран, сценарий №2):  
1 – здание кафе; 2 – место эмитсии химического агента;  
3 – вертикальный экран

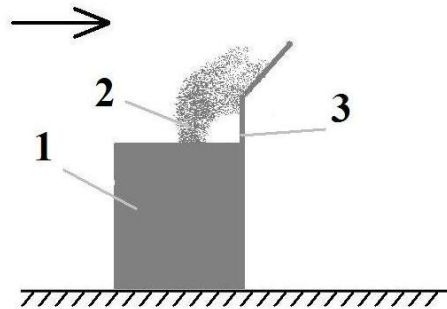


Рис. 5. Схема эмитсии химического агента на крыше кафе (защитная мера – наклонный экран, сценарий №3):  
1 – здание кафе;  
2 – место эмитсии химического агента;  
3 – наклонный экран

Необходимо оценить эффективность применения экранов на минимизацию уровня загрязнения воздушной среды возле кафе.

Зона загрязнения атмосферного воздуха возле кафе для каждого рабочего сценария показана на рис. 6–8.

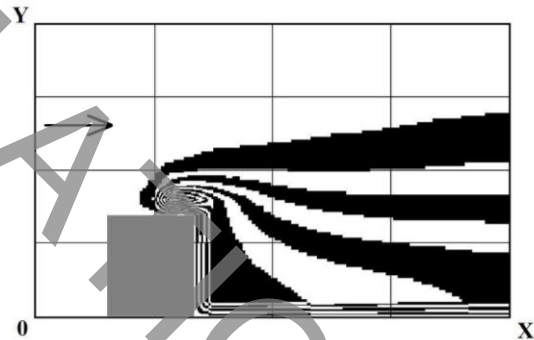


Рис. 6. Изолинии концентрации загрязнителя возле кафе (без элементов защиты, сценарий №1)

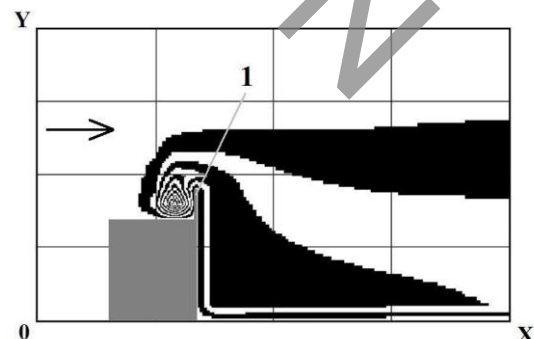


Рис. 7. Изолинии концентрации загрязнителя возле кафе (защитная мера – вертикальный экран, сценарий №2): 1 – вертикальный экран

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

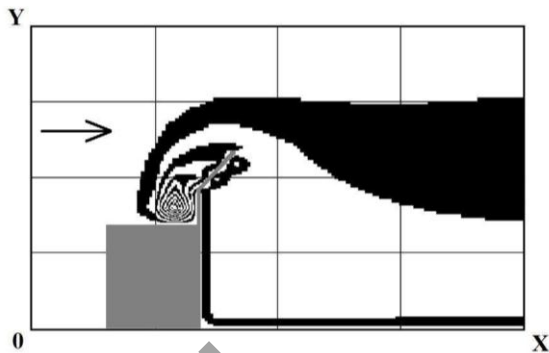


Рис. 8. Изолинии концентрации загрязнителя возле кафе (защитная мера – наклонный экран, сценарий №3)

Из рис. 8 видно, что применение наклонного экрана дает возможность отвести струю загрязненного воздуха от кафе. Для более детального

анализа эффективности применения экранов в табл. 1 представлено значение концентрации загрязнителя на различном расстоянии от здания, уровень 1,7 м – рост человека для всех рассматриваемых сценариев.

Как видно из табл. 1, применение экранов на крыше здания позволяет снизить концентрацию химически опасного вещества на улице и тем самым минимизировать риск токсичного поражения людей при теракте. Очевидно, что для рассматриваемого случая более эффективным является применение наклонного экрана (сценарий № 3).

Отметим, что время решения задачи составляет порядка 5 сек.

Таблица 1

**Безразмерная концентрация загрязнителя на разном расстоянии от здания кафе**

Расстояние от здания кафе, м	Концентрация, сценарий №1	Концентрация, сценарий №2	Концентрация, сценарий №3
2,5 м	1,26	0,98	0,78
4,5 м	1,16	0,93	0,75
5,5 м	1,12	0,91	0,74
9,5 м	1,02	0,86	0,70
11,5 м	0,98	0,83	0,68

### Научная новизна и практическая значимость

Разработана численная модель, позволяющая определить эффективность инженерных методов минимизации уровня загрязнения воздушной среды на улице в случае инициированного (теракт) загрязнения ее высокотоксичным химическим агентом.

Особенностью построенной модели является использование уравнения конвективно-диффузионного рассеивания химического агента совместно с уравнением для расчета поля скорости ветрового потока возле здания (модель потенциального течения). Затраты компьютерного времени на реализацию разработан-

ной численной модели составляют несколько секунд.

Исследования, проведенные на базе численного моделирования, показали, что применение экранов на крыше здания позволяет снизить уровень загрязнения атмосферного воздуха в определенной зоне возле здания.

### Выводы

Разработана численная модель для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха возле здания в случае выброса химического агента на его крыше. Модель позволяет оценить влияние экранов на защиту атмосферного воздуха от загрязнения при таком выбросе. Основой решения задачи является численное моделиро-

---

 ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ
 

---

вание на базе уравнений, описывающих рассеивание примеси и аэродинамику.

Дальнейшее совершенствование данного направления следует проводить в направлении

разработки трехмерной численной модели, ориентированной на решение задач данного класса.

## 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. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
4. 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.
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. 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.
7. 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: 10.15802/stp2016/60953
8. Biliaiev, M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharitonov // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. – Dordrecht, 2012. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15
9. CEFIC Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations [Электронный ресурс] // Croner-i. – Режим доступа: <https://app.croner-i.co.uk/news/cefic-guidance-safety-risk-assessment-chemical-transport-operations?product=139> – Загл. с экрана. – Проверено : 29.01.2018.
10. Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility / Aleksandr Tumanov, Vasily Gumenyuk, Vladimir Tumanov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 90. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012027
11. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling / Zahra Naserzadeh, Farideh Atabi, Faramarz Moattar, Naser Moharram Nejad // Bioscience Biotechnology Research Communication. – 2017. – Vol. 10 (1). – P. 192–204.
12. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain / Cejun Cao, Congdong Li, Qin Yang, Fanshun Zhang // Sustainability. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 11. doi: 10.3390/su9112103
13. Protective Action Criteria. A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations [Электронный ресурс] // Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. – Edmonton, Alberta, 2017. – Режим доступа: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> – Загл. с экрана. – Проверено : 14.06.2018.
14. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes / Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlabka, Jan Bitta // The Science for Population Protection. – 2015. – No. 2.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1\*</sup>, О. В. БЕРЛОВ<sup>2\*</sup>, І. В. КАЛАШНІКОВ<sup>3\*</sup>, В. А. КОЗАЧИНА<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський 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, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Каф. «Безпека життєдіяльності», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24 а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта berlov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>3\*</sup>ДП «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту України «Укрзалізничпроект», вул. Конарева, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>4\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

## АНТИТЕРОРИСТИЧНИЙ ІНЖИНІРИНГ ПРИ МОЖЛИВОМУ ТЕРАКТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ХІМІЧНОГО АГЕНТА НА ВУЛИЦІ

**Мета.** Дана робота передбачає розробку методу локального зниження на вулиці концентрації хімічно небезпечної речовини, яка надійшла в атмосферу через вентиляційний викид на даху кафе, а також створення чисельної моделі для розрахунку зони хімічного зараження, яка дозволяє оцінити ефективність застосування екранів, що мінімізують його рівень. **Методика.** Для вирішення поставленого завдання використано рівняння для потенціалу швидкості, на базі якого визначено поле швидкості повітряного потоку, і рівняння конвективно-дифузійного розсіювання хімічно небезпечного агента в атмосферному повітрі, викинутого в разі теракту через систему вентиляції. При моделюванні були враховані нерівномірне поле швидкості вітрового потоку, атмосферна дифузія, інтенсивність викиду хімічно небезпечного агента. При чисельному інтегруванні рівняння для потенціалу швидкості використаний метод Лібмана. Для чисельного рішення рівняння конвективно-дифузійного розсіювання домішки використана неявна попеременно-трикутна різницєва схема розщеплення. **Результати.** На основі розробленої чисельної моделі подана оцінка ефективності застосування екранів на будівлі для зниження концентрації небезпечної речовини та мінімізації ризику токсичного ураження людей на вулиці при ініційованому викиді хімічного агента. Побудована чисельна модель може бути реалізована на комп'ютерах малої та середньої потужності, що дозволяє широко використовувати її для вирішення завдань даного класу при розробці стратегії антитерористичного інжинірингу. **Наукова новизна.** Запропоновано ефективну чисельну модель для розрахунку зони зараження людей на вулиці при можливому теракті з використанням хімічного (біологічного) агента. Модель також може бути застосована для оцінки ефективності деяких захисних заходів, спрямованих на зниження рівня забруднення повітряного середовища під час теракту. **Практична значимість.** Розроблена чисельна модель може бути використана для організації захисних заходів біля соціальних об'єктів можливої хімічної атаки терориста.

**Ключові слова:** теракт; хімічне забруднення атмосфери; антитерористичний інжиніринг; чисельне моделювання

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1\*</sup>, О. В. БЕРЛОВ<sup>2\*</sup>, І. В. КАЛАШНІКОВ<sup>3\*</sup>, В. А. КОЗАЧИНА<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk 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>Dep. «Life Safety», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskogo str., 24a, 49600, tel. +38 (056) 756-34-57 e-mail berlov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>3\*</sup>State Enterprise «Design and Exploration Institute of Railway Transport of Ukraine «Ukrzaliznichproekt», Konarev St., 7, Kharkiv, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>4\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532



## ANTI-TERROR ENGINEERING IN THE CASE OF POSSIBLE TERRORIST ATTACKS WITH CHEMICAL AGENTS

**Purpose.** This work aims to develop a method of local outdoor reduction of the concentration of a chemically hazardous substance, which entered the atmosphere through a cafe roof vent. It also involves the creation of a numerical model for calculating the chemical contamination zone that allows assessing the effectiveness of the screens used to minimize its level. **Methodology.** To solve this problem, we used the velocity potential equation that allowed to determine the air flow velocity field, and the equation of convective diffusion dispersion of a chemically hazardous agent in the atmospheric air emitted through the ventilation system in case of a terrorist attack. The simulation took into account the uneven velocity field of the wind flow, atmospheric diffusion, emission rate of a chemically hazardous agent. In the numerical integration of the velocity potential equation, we used the Liebmann method. For the numerical solution of the equation of convective diffusion dispersion of the impurity, an implicit alternate-triangular difference splitting scheme was used. **Findings.** The developed numerical model allowed assessing the effectiveness of building screens used to reduce the concentration of a hazardous substance and minimize the risk of toxic damage to people outdoor during an initiated emission of a chemical agent. The constructed numerical model can be implemented on computers of low and medium power, which allows it to be widely used for solving problems of the class under consideration when developing an anti-terror engineering strategy. **Originality.** An effective numerical model for calculating the outdoor chemical contamination zone during a possible terrorist attack using a chemical (biological) agent has been proposed. The model can also be applied to assess the effectiveness of some protective measures aimed at reducing the air pollution level during a terrorist attack. **Practical value.** The developed numerical model can be used to organize protective actions near social objects of a possible chemical attack by a terrorist.

**Keywords:** terrorist attack; chemical air pollution of the atmosphere; anti-terror engineering; numerical simulation

### REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: Uchebnoye posobie dlya vuzov*. Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka. (in Russian)
4. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., Kirichenko, P. S., & Muntyan, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogenogo riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoi Rog: Kozlov R. A. (in Russian).
5. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
6. Barret, A. M. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. (Dissertation of Doctor of Philosophy). Carnegie Mellon University, Pittsburg. (in English)
7. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. doi: 10.15802/stp2016/60953 (in English)
8. 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*, 87-91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15 (in English)
9. CEFIC Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations. *Croner-i*. Retrived from <https://app.croneri.co.uk/news/cefic-guidance-safety-risk-assessment-chemical-transport-operations?product=139> (in English)
10. Tumanov, A., Gumenyuk, V., & Tumanov, V. (2017). Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 90. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012027 (in English)
11. Zahra Naserzadeh, Farideh Atabi, Faramarz Moattar, & Naser Moharram Nejad. (2017). Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling. *Bioscience Biotechnology Research Communication*, 10(1), 192-204. (in English)

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

---

12. Cao, C., Li, C., Yang, Q., & Zhang, F. (2017). Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability*, 9(11). doi: 10.3390/su9112103 (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. Retrived from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
14. Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlabka, & Jan Bitta. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The Science for Population Protection*, 2. (in English)

Поступила в редколлегию: 30.07.2018

Принята к печати: 14.11.2018

TRANSLATION